



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de la infiltración, escorrentía y erosión superficial en un talud experimental

Treball realitzat per:

Andrés Velásquez Cobo

Dirigit per:

Antonio Lloret

Marcel Hürlimann

Màster en:

Enginyeria del terreny

Barcelona, 23/01/2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agradecimientos

A mis tutores Antonio Lloret y Marcel Hurlimann, por ser un soporte constante en conocimientos, experiencia y voluntad para la realización de mi trabajo de fin de master.

A mi hijo por ser quien me centra y me da fuerzas para conseguir mis metas.

Especialmente a mi madre, padre y hermana por ser ejemplos de vida

Y a mis amigos de master por ser una familia en Barcelona.

A todos ellos, gracias.

RESUMEN

SMuCPhy es un proyecto desarrollado por docentes e investigadores, para analizar las roturas superficiales en laderas, causadas por los agentes climáticos, en condiciones vegetadas y no vegetadas. Para esto se diseñó un terraplén a escala en el Parc UPC Agróplis, altamente instrumentado, con el objetivo de medir la interacción continua del flujo de agua, calor y gas con el suelo, causado por condiciones atmosféricas. La caracterización del suelo se explica en el trabajo de (Cevallos, 2017) y la instrumentación se completó en el trabajo de (Guachizaca Contento, 2018).

Con el objetivo de seguir evaluando la afectación de las laderas se plantea este trabajo para evaluar la infiltración, erosión y escorrentía, a más de seguir evaluando las medidas de contenido volumétrico de agua, succión, temperatura, presiones de agua y agentes climáticos.

Con los datos de medida en el suelo vegetado y no vegetado se pudo detectar parámetros que contribuyen o perjudican a la estabilidad. El análisis en conjunto de estas medidas se relacionan también para definir curvas de retención (gráfica esencial de la predicción y entendimiento del flujo de agua en el suelo) y fórmulas empíricas para determinar el incremento del contenido volumétrico de agua en función de su contenido volumétrico inicial y el incremento de precipitación. Por lo tanto, estamos hablando de evaluaciones comparativas, informativas, correctivas y que contribuyen al desarrollo de obras de estabilidad.

Parte de este trabajo fue complementar el diseño para medir escorrentía e implantación de la metodología en campo. Debido a que a la erosión está en función de la escorrentía e infiltración, se cuantifica también el material erosionado para relacionar estos parámetros con teorías de erosionabilidad.

Finalmente con la escorrentía, la erosión y más los datos de infiltración, succión, características del suelo, se entiende mejor su reducción de erosión en el suelo

vegetado, su dependencia para que el fenómeno ocurra, cualificar la relevancia de su impacto en la estabilidad y ajustar parámetros para futuras líneas de modelación.

ABSTRACT

SMuCPHy is a project developed by teachers and researchers, to analyze landslides in slopes, caused by climatic agents, in vegetated and non-vegetated conditions. For this, a highly instrument scale embankment was designed in the Parc UPC Agróplis, with the objective of measuring the continuous interaction of water, heat and gas flow with the soil, caused by atmospheric conditions. The characterization of the soil is explained in the work of (Cevallos, 2017) and the instrumentation was completed in the work of (Guachizaca Contento, 2018).

In order to continue evaluating the affectation of the slopes, this work is proposed to evaluate the infiltration, erosion and runoff, besides continuing to evaluate the measurements of volumetric content of water, suction, temperature, water pressures and climatic agents.

With the measurement data in the vegetated and non-vegetated soil, it was possible to detect parameters that contribute or impair stability. The joint analysis of these measures is also related to define retention curves (essential graph to the prediction and understanding of the water flow in the soil) and empirical formulas to determine the increase of volumetric water content, based on the initial volumetric content and the increase in precipitation. Therefore, we are talking about comparative, informative, and corrective evaluations that contribute to the development of stability works.

Part of this work was dedicated to complement the design and implementation of the methodology to measure the erosion and runoff in the field. Because erosion is a function of overprecipitation and infiltration, eroded material is also quantified to relate modelling parameters and compare with published international theories.

Finally with overprecipitation, erosion and more data on infiltration, suction, soil characteristics, it is better understood the reduction of erosion in vegetated soil, its

dependence for the phenomenon to occur, to qualify the relevance of its impact on stability and adjust parameters for future modeling lines.

Índice

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estructura del trabajo	3
2. Instrumentación en el terraplén	4
3. Análisis de datos registrados	9
3.1 Descripción de resultados.....	9
3.1.1 Talud Norte No Vegetado.....	9
3.1.2 Talud Norte Vegetado	17
3.1.3 Talud Sur No Vegetado.....	23
3.1.4 Talud Sur Vegetado	30
3.2 Análisis comparativo.....	35
3.2.1 Norte Vegetado-No Vegetado.....	35
3.2.2 Sur Vegetado-No Vegetado.....	44
3.3 Curva de retención.....	51
3.3.1 Lado Norte	52
3.3.2 Lado Sur	60
3.3.3 Definición de la curva de retención.....	68
3.4 Estimación empírica para el incremento de contenido volumétrico de agua	75
4. Infiltración, escorrentía y erosión	81
4.1 Precipitación	82
4.2 Escorrentía	84
4.3 Infiltración.....	88
4.4 Erosión	92
4.4.1 Formulación empírica.....	92
4.4.2 Metodología	94
4.4.3 Resultados	98
5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras.....	102
5.1 Conclusiones	102
5.2 Líneas de trabajo futuras	103

6. Referencias	104
ANEXOS.....	105
ANEXO 1 Ensayos de laboratorio.....	105
ANEXO 2 Curva de retención.....	109
ANEXO 3 Erosionabilidad del suelo	110
ANEXO 4 Plano de detalle del rebosadero de la canaleta para medir el canal de escorrentía.....	112

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Obras de ingeniería, como movimiento de tierras u obras lineales, donde los taludes productos de su misma ejecución, están expuestos a agentes climáticos presentan una problemática para asegurar su estabilidad. Obviando la buena o mala ejecución de la obra, la precipitación, erosión y terremotos, son causales de las roturas superficiales en laderas (Casini et al., 2016).

Al profundizar la relación entre estas causales y las roturas de laderas superficiales, el mayor agravante para este tipo de roturas es la precipitación, debido a la relación entre la saturación y las presiones de agua en los poros del suelo. En general esta relación depende de la conductividad hidráulica y de las propiedades únicas del suelo parcialmente saturado.

Existen ya experimentos que se han desarrollado, como en el río Rhine en Suiza donde trata la rotura de un talud empinado provocado por la lluvia (Casini et al., 2016) o la predicción de roturas por lluvias de poca duración y gran intensidad (P. Orense, Shimoma, Maeda, & Towhata, 2004), entre otras. En este caso el trabajo es parte de un proyecto nacional con una duración de 4 años llamado SMuCPhy, financiado por el “Ministerio de Economía y Competividad del Gobierno de España” y coordinado por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la UPC Barcelona TECH, donde se realizó un terraplén altamente instrumentado, con un lado vegetado y otro no vegetado, para analizar la pérdida de material superficial en taludes causadas por cambios climáticos y la modelación de ciertos fenómenos para prevenir y mitigar deslizamientos.

El nombre SMuCPhy se explica en el TFM de (Guachizaca Contento, 2018) como *“Slope mass-wasting under climate change. Physical mechanisms, predictive modelling and possible mitigation strategies”*.

A diferencia de otras investigaciones, en esta se puede evaluar el comportamiento en dos laderas compuestas por un mismo suelo, en particular parcialmente saturado, pero a más de esto presenta un lado vegetado como mejora a la estabilidad y un lado no

vegetado. Por lo tanto, estamos hablando de evaluaciones comparativas que no solo son informativas sino correctivas y contribuyen al desarrollo de obras de estabilidad.

Hasta antes de este trabajo de fin de master (TFM) la instrumentación del terraplén facilitaba evaluar la saturación del suelo debido a la infiltración, pero no se conocía la erosión del material debido a la escorrentía. La erosión no se considera una falla, pero si un comportamiento relevante que suma a la inestabilidad de un talud. Al implementar un sistema para medir la escorrentía más los datos de infiltración, succión, características del suelo y la evaluación del material erosionado, se entiende mejor su comportamiento de erosión, su dependencia para que el fenómeno ocurra y se puede cuantificar la relevancia de su impacto en la estabilidad de un talud.

En concreto este TFM trata sobre cómo complementar el diseño del terraplén, la instrumentación, ensayos en campo y prueba de los sensores en laboratorio para continuar con el análisis de las interacciones entre suelos no saturados vegetados y no vegetados con la infiltración del agua por cambios climáticos en laderas, además de proporcionar datos para la calibración de modelos numéricos en Codebright.

1.2 Objetivos

- Realizar ensayos de infiltración en campo y ajustar parámetros de conductividad hidráulica del suelo.
- Instrumentar el terraplén para medir la escorrentía.
- Caracterizar el material erosionado.
- Comparar datos por la instrumentación del lado vegetado y no vegetado.
- Relacionar y analizar en conjunto los datos obtenidos por la instrumentación, ensayos en campo y teorías en relación al tema en concreto.

1.3 Estructura del trabajo

El trabajo se divide en 5 capítulos descritos a continuación:

El capítulo 1, contiene la introducción, antecedentes y objetivos del trabajo

El capítulo 2, detalla de la instrumentación en el terraplén y colaboración en campo.

El capítulo 3, contiene los resultados independientes, desde el día 28 de marzo del 2017 hasta el 1 de diciembre del 2018. El análisis comparativo entre el lado vegetado y no vegetado del lado norte y sur, y el análisis en conjunto de resultados y deducción de comportamientos a partir de los datos obtenidos (curvas de retención, comportamientos del contenido volumétrico de agua).

El capítulo 4, describe la teoría, la metodología y los resultados de infiltración, escorrentía y erosión obtenidos en campo y laboratorio.

El capítulo 5, describe las conclusiones y plantea líneas de investigación.

2. Instrumentación en el terraplén

En el marco del proyecto SMuCPhy se construye un terraplén a escala media altamente instrumentado en el Parc UPC Agròpolis, en el Delta del Llobregat, provincia de Barcelona. (Ver Fig. 1)



Fig. 1 Ubicació del Projecte SMuCPhy (GoogleMaps, 2018)

A continuació se mostra la Fig. 2, presentada en el TFM por (Guachizaca Contento, 2018), donde se detalla en planta la ubicació de los sensores e instrumentació en el terraplén. Se visualiza el lado norte y sur, la parte no vegetado y distinguido por un color verde el lado vegetado y con círculos celestes la ubicació de los sensores capaces de medir contenido volumétrico de agua (CVW), temperatura interna del suelo, succión y flujo de calor en profundidad y superficialmente la precipitación, humedad relativa, velocidad de viento. En el centro y marcado con un círculo azul se encuentra la estación meteorológica y sensores para medir la velocidad y dirección del viento. Adicionalmente se incorporan dos sensores Sun Rad Davis Pyranometer, capaces de medir la radiación

neta, pero no se detallan en ningún plano debido a que se reubican cada cierto tiempo para tener datos de todas las zonas del terraplén.

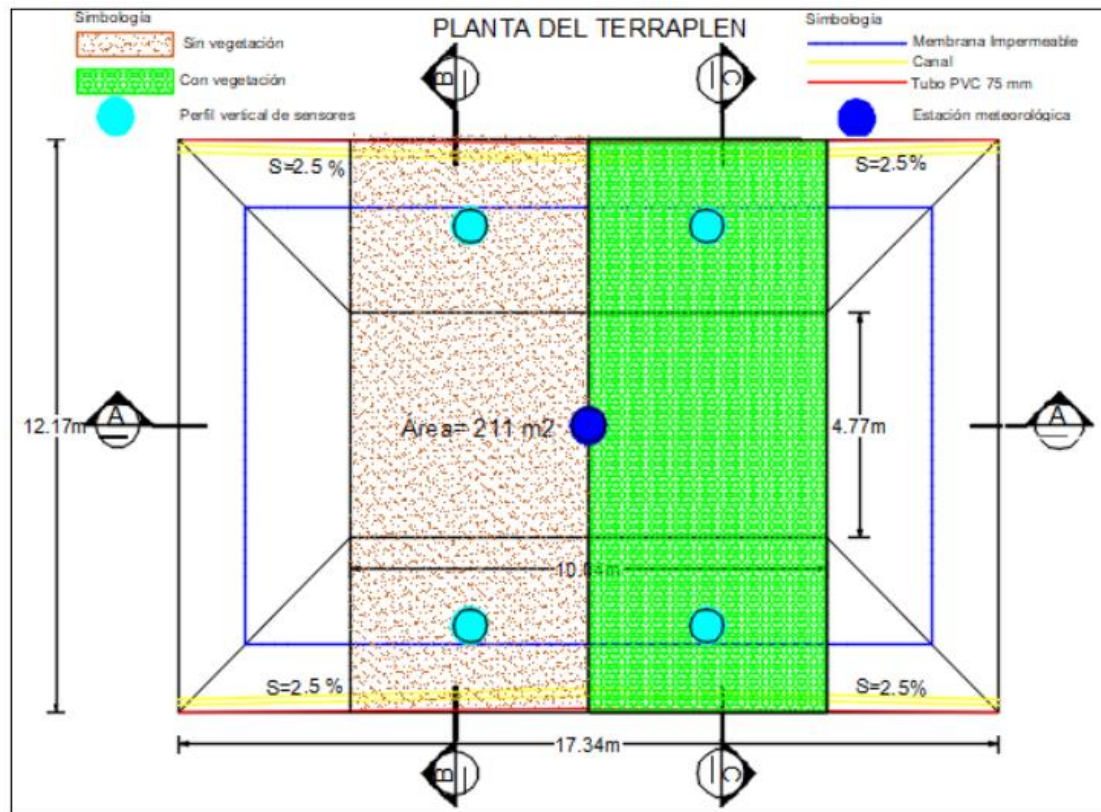


Fig. 2 Detalle en planta de la instrumentación y características del terraplén (Guachizaca Contenido, 2018)

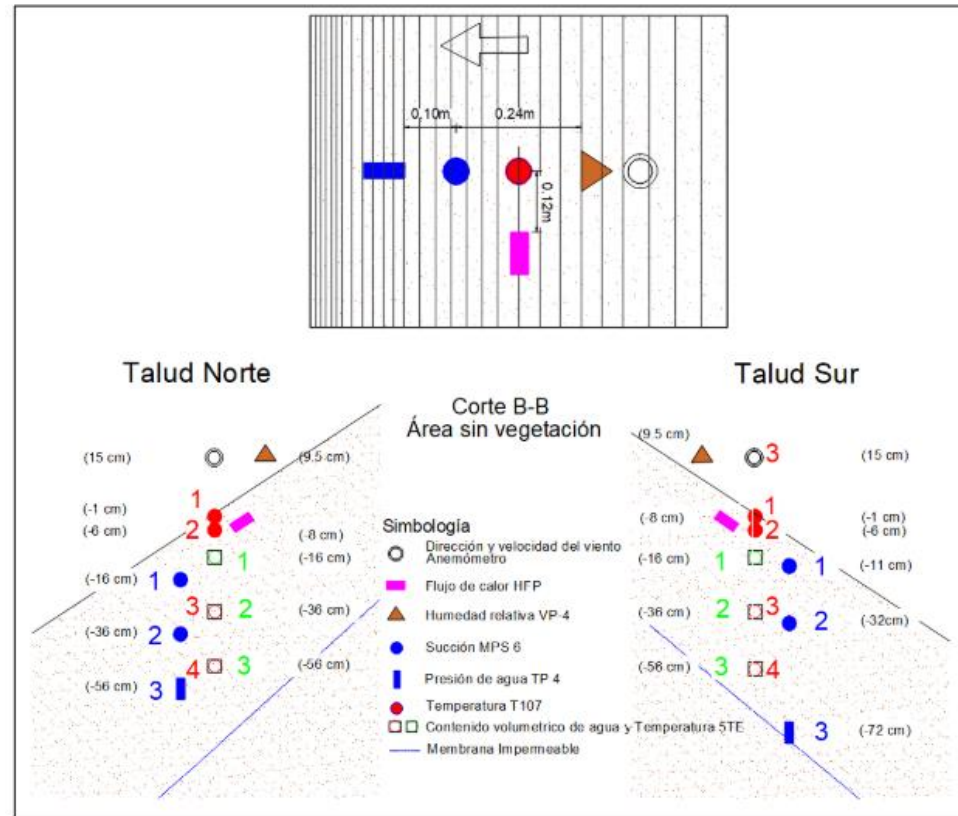


Fig. 3 Detalle en planta y perfil, lado no vegetado del terraplén (Guachizaca Contenido, 2018)

Como se ve en la Fig. 3 lado no vegetado del terraplén, tomada de (Guachizaca Contenido, 2018), los sensores ilustrados en círculos de color blanco miden la dirección del viento, en triángulos miden la humedad relativa, en círculos rojos miden la temperatura; en cuadrados el contenido volumétrico de agua (CVW) y la temperatura, en círculos rojos la succión, en rectángulos rosados el flujo de calor y en rectángulos azules la presión de agua. Para más detalle de la instrumentación se pueden ver los TFM de (Guachizaca Contenido, 2018) y (Cevallos, 2017).

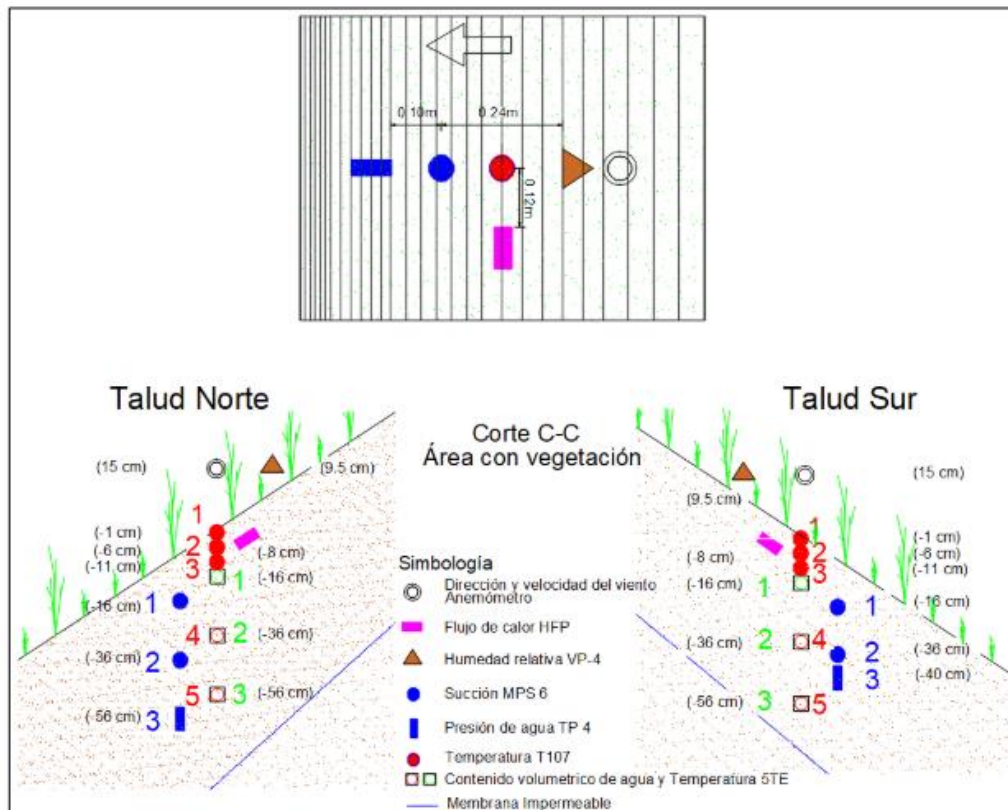


Fig. 4 Detalle en planta y perfil, lado vegetado del terraplén (Guachizaca Contenido, 2018)

En la Fig. 4, lado vegetado del terraplén tomada de (Guachizaca Contenido, 2018), se visualizan los mismos sensores con la diferencia, a más de ciertas ubicaciones diferentes, dos sensores más de temperatura ilustrados en círculos rojos.

Parte de este TFM, fue la colaboración el día 15 de marzo del 2018 en desbroce de la vegetación silvestre como se ve en la Fig. 5 y el día 16 de marzo del 2018 en el sembrado del lado vegetado y excavación y replanteo para las canaletas como se ve en la Fig. 6 y toma de muestras para ensayos en laboratorio.



Fig. 5 Lado Norte del terraplén con vegetado silvestre y sin vegetación



Fig. 6 Lado Norte del terraplén desbrozado, sembrado vegetación, colocación de canaletas y lado sin vegetación

3. Análisis de datos registrados

3.1 Descripción de resultados

3.1.1 Talud Norte No Vegetado

3.1.1.1 Temperatura ambiente

Según el sensor Decagon ECRN-100 y como se indica en Fig. 7 desde marzo del 2017 hasta mediados de junio la temperatura es ascendente de 15 a 25 °C promedio. Seguido de esta fecha se tiene una temperatura promedio de 25 °C, máximos de 37 °C y mínimas de 17 °C. A partir de mediados de agosto las temperaturas son descendientes de 25 a 10 °C promedio hasta el 21 de noviembre del 2017. Desde finales de noviembre del 2017 a principios de abril del 2018, la temperatura ambiente promedio es de 10 °C, máximos de 23 °C y con temperaturas mínimas de 0°C.

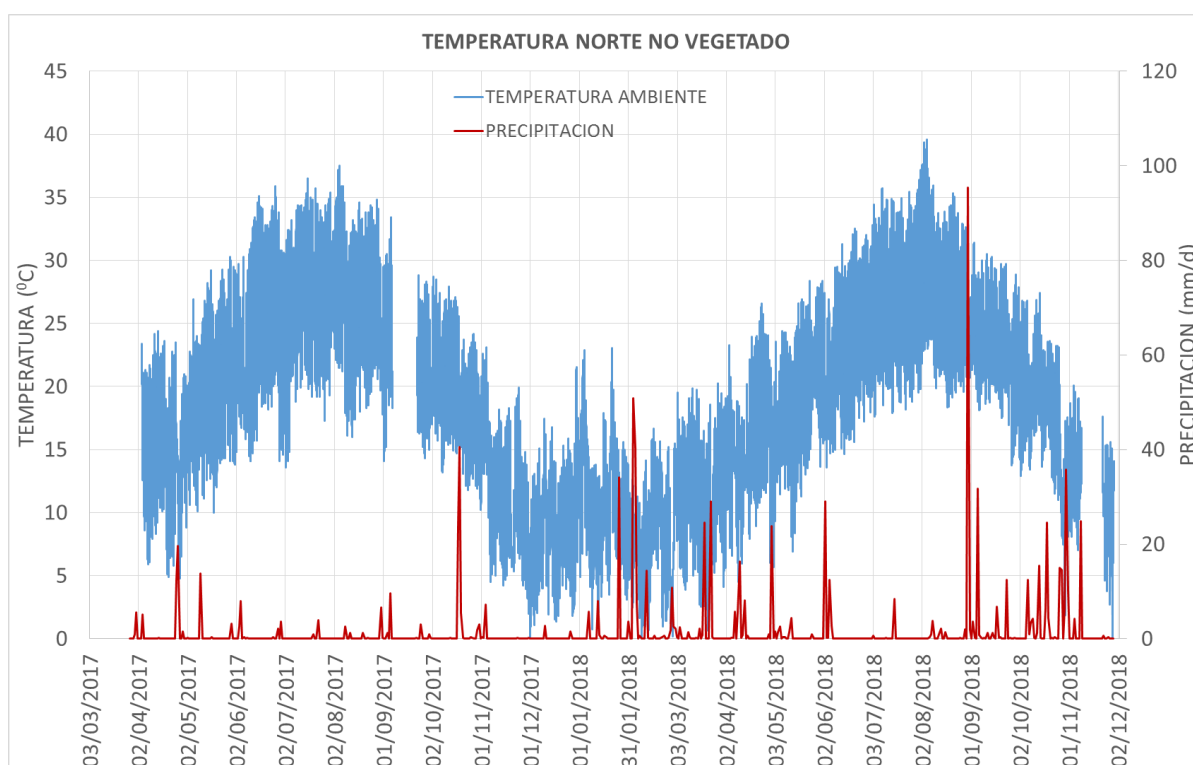


Fig. 7 Temperatura Ambiente Talud Norte no Vegetado

A partir de abril del 2018, la temperatura ambiente promedio sube hasta principios de julio, donde empieza una temporada promedio de 27 °C, máximos de 40 °C y

temperaturas mínimas de 18 °C hasta finales de agosto del 2018 aproximadamente (Ver Fig. 7).

Desde principios de septiembre hasta mediados de octubre del 2018 la temperatura es descendente hasta 22 y 17 °C promedio (Ver Fig. 7).

En la Fig. 7, marcado en rojo y en el eje secundario se detalla la precipitación. Se observan precipitaciones continuas desde finales de enero hasta principios de mayo del 2018 y desde septiembre a principios de noviembre del 2018. Los días de precipitaciones más relevantes se presentan el día 31 de agosto del 2018 y el día 4 de febrero del 2018 con 95 y 50.8 milímetros acumulados respectivamente.

3.1.1.2 *Temperatura en el subsuelo*

Según la medida de los sensores (SoilTemp NnV) desde finales de marzo del 2017 hasta mediados de julio del 2017 la temperatura es ascendente, donde a menor profundidad la temperatura es mayor y va en orden descendente a mayor profundidad. A partir de julio hasta agosto del 2017 la temperatura a 16, 36 y 56 cm de profundidad es de 32, 30 y 28 °C respectivamente. Desde finales de agosto hasta el 21 de noviembre del 2017 las temperaturas son decrecientes donde a menor profundidad la temperatura es menor que a mayor profundidad en el orden de 11, 12 y 13 °C a 56, 36 y 16 cm de profundidad y se mantiene así con mínimos de 3 °C hasta mediados de marzo del 2018 (Invierno). (Ver Fig. 8).

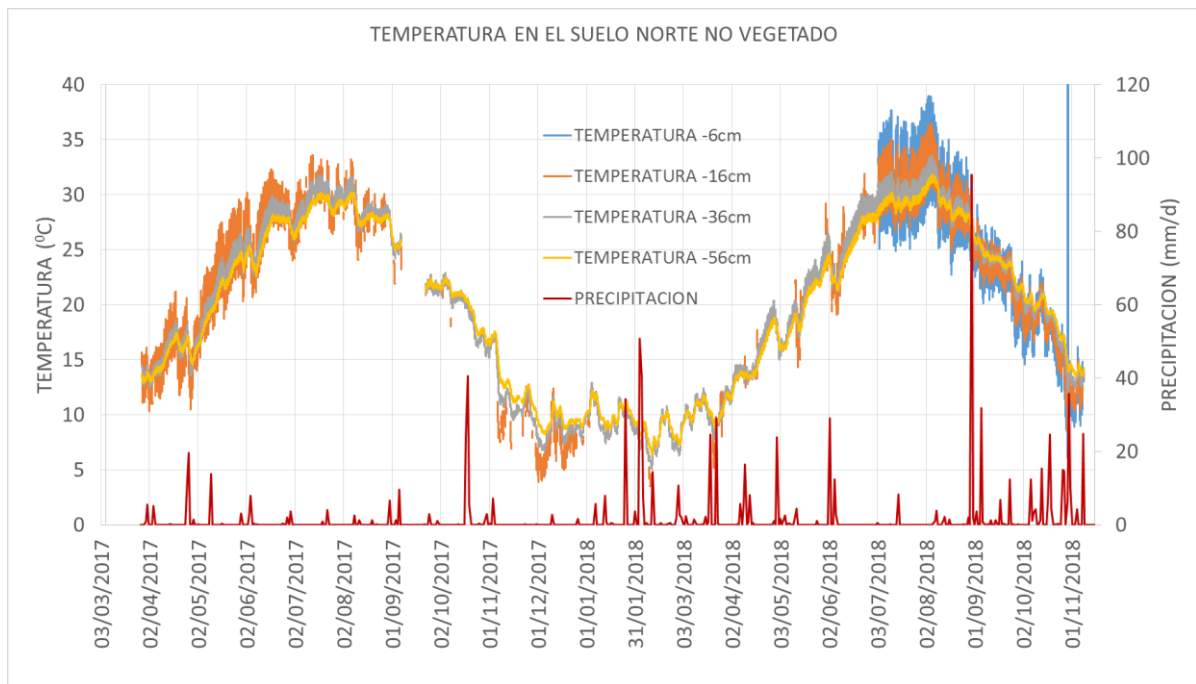


Fig. 8 Temperatura en el suelo del Talud Norte no Vegetado

En primavera las temperaturas se elevan y los sensores a menor profundidad de 16 cm superan las temperaturas a 36 y 56 cm, llegando a 32, 28 y 27 °C respectivamente, esto continúa hasta finales de agosto (finales de verano) con un sensor más a 6 cm de profundidad con máximos de 39 °C y a 16, 36 y 56 cm de profundidad máximos de 36, 33 y 32 °C. A partir de agosto las temperaturas empiezan a bajar y las temperaturas a mayor profundidad empiezan a superar a las de menor profundidad (Ver Fig. 8).

3.1.1.3 Contenido volumétrico de Agua

Según los sensores (NnV_VWC) colocados a 16, 36 y 56 cm de profundidad desde finales de marzo del 2017 el contenido volumétrico de agua (CVW) se mantiene en un rango de 0.27, 0.25 y 0.3 m³/m³ respectivamente. A partir de finales de abril debido a las lluvias el CVW sube en un rango de 0.02 m³/m³ y seguidamente decrece hasta mediados de junio. A partir de esta fecha desciende con una mayor pendiente donde los valores de CVW a las profundidades de 16, 36 y 56 cm llegan a ser de 0.17, 0.18 y 0.205 m³/m³ respectivamente (Ver Fig. 9).

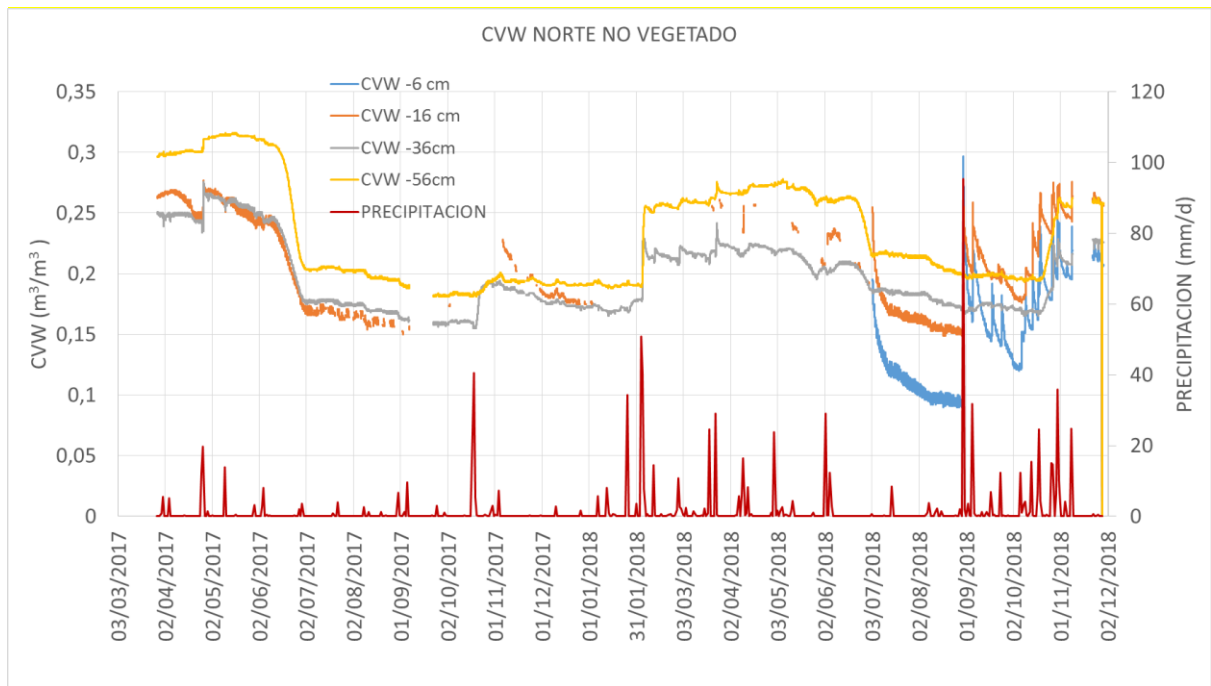


Fig. 9 Contenido Volumétrico de Agua del Talud Norte no Vegetado

Desde el 1 de junio del 2017 el CVW es descendiente en el mismo orden de 0.005 por mes, donde existen precipitaciones pero no relevantes para provocar un cambio en el CVW hasta el 18 de septiembre del 2017, donde se presenta una precipitación de 23.4 mm/d y al día siguiente de 41 mm/d, provocando un cambio ascendente de 0.23, 0.19 y 0.20 m^3/m^3 a las profundidades de 16, 36 y 56 cm respectivamente (Ver Fig. 10).

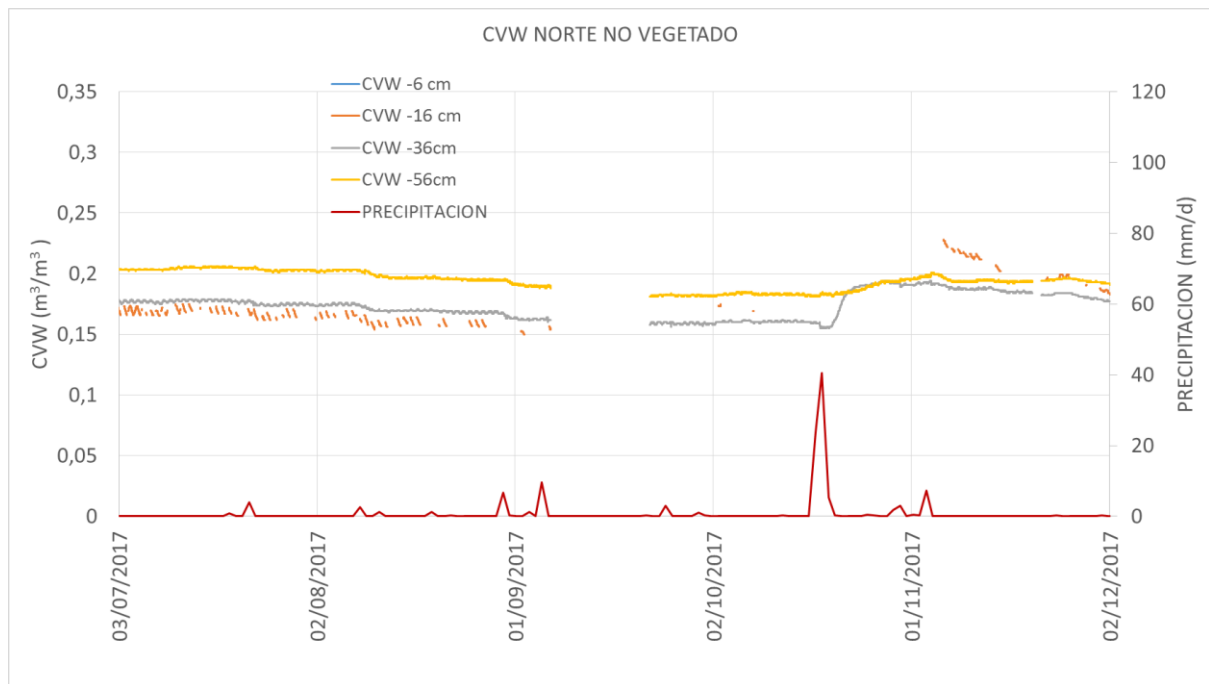


Fig. 10 Contenido Volumétrico de Agua del Talud Norte no Vegetado

Se visualiza en la Fig. 11 que a 6, 16, 36 y 56 cm de profundidad, desde mediados de octubre del 2017 el contenido volumétrico de agua es descendiente hasta valores de 0.18, 0.175 y 0.19 m^3/m^3 respectivamente. A partir del 26 de enero del 2018 existe una precipitación de 34.2 a 51 mm/d que produce un incremento del contenido volumétrico de agua (CVW) hasta valores de 0.26 y 0.22 m^3/m^3 en los sensores a 56 y 36 cm de profundidad respectivamente. Hasta finales de abril tiene un comportamiento similar que asciende el CVW dependiendo de las precipitaciones y con una conducta donde a mayor profundidad existe mayor CVW.

Desde principios de mayo del 2018 no existe un cambio en el orden de contenido volumétrico de agua a diferentes profundidades, que lo que llevaba pasando anteriormente hasta principios de Julio, donde existen ciertas precipitaciones que eleva nuevamente el CVW de 16 cm superando a la de 56 cm y la de 6 cm supera a la de 36 cm de profundidad. A partir de julio del 2018 hasta finales de agosto existe un comportamiento uniforme y descendente de 0.02 m^3/m^3 por mes, debido a la época de verano donde el CVW es 0.1, 0.15, 0.17 y 0.22 m^3/m^3 a 6, 16, 36 y 56 cm de profundidad. Este descenso es mayor que el observado en el verano del año 2017. Desde principios de agosto comienzan precipitaciones relevantes y seguidas provocando cambios del

contenido volumétrico de agua únicamente a profundidades menores, hasta mediados de octubre del 2018 que el CVW a mayores profundidades también empieza a ascender.

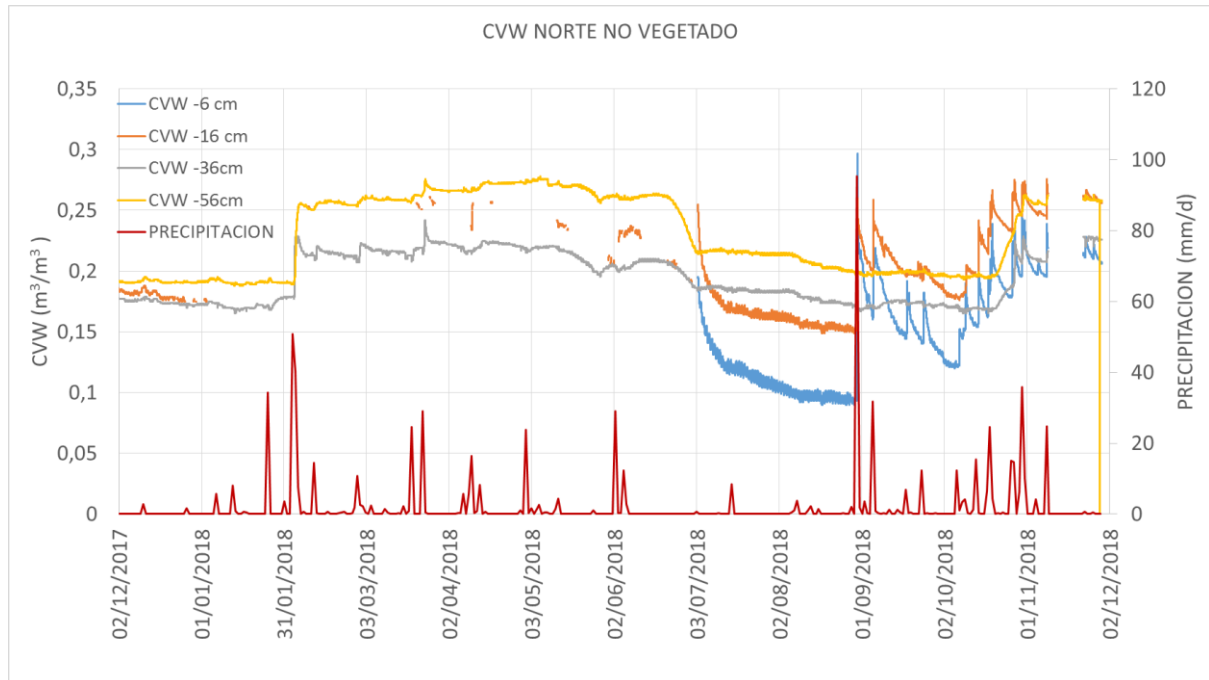


Fig. 11 Contenido Volumétrico de Agua Talud Norte no Vegetado (Noviembre2017-Noviembre2018)

3.1.1.4 Succión

Según los sensores de succión MPS, se observa que desde el 28 de marzo hasta el 08 de septiembre del 2017 la succión es ascendente siendo mayor a 16 cm que a 36 cm de profundidad llegando a 2700 y 1900 kPa respectivamente. A partir del 29 de septiembre del 2017 existen precipitaciones que provocan que la succión a 16 cm de profundidad descienda por debajo de las de 36 cm y seguido de la ausencia de precipitaciones asciende a 4000 kPa (16cm) y 3760 kPa (36cm). A partir del 18 y 19 octubre donde se detectan precipitaciones de 23.4 y 40 mm/d provoca que la succión descienda hasta el 21 de noviembre del 2017 a 75 kPa (36cm) y 10 kPa(16cm) (Ver Fig. 12 y Fig. 14).

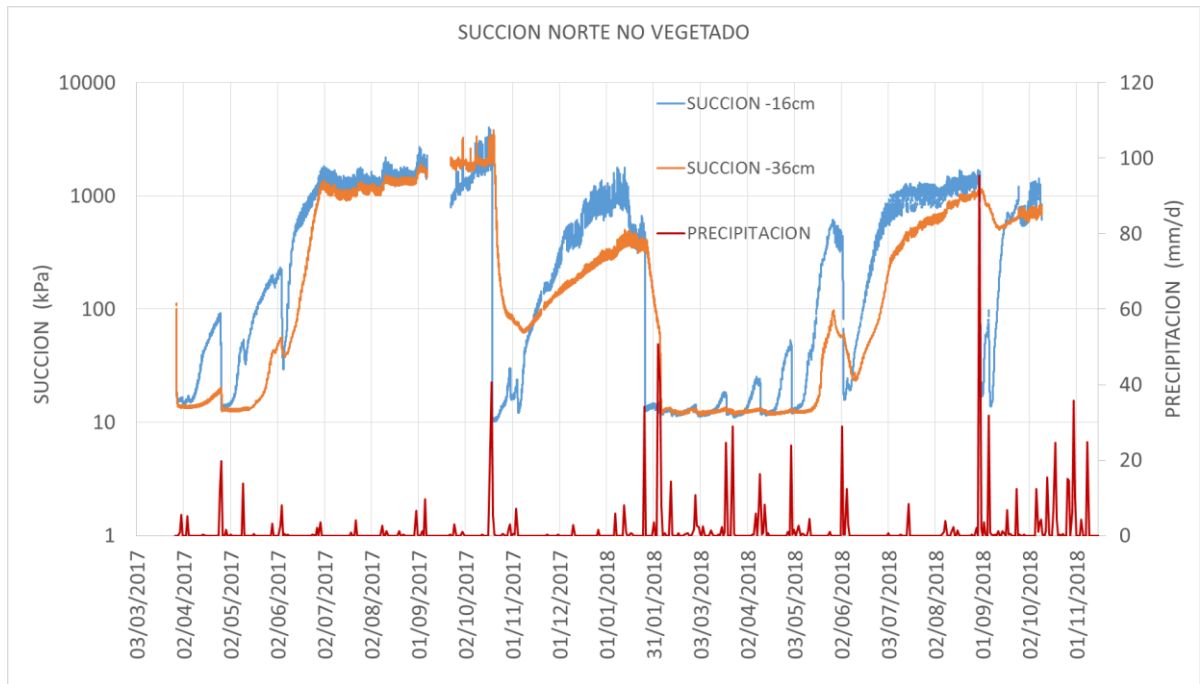


Fig. 12 Succión en el Suelo Talud Norte no Vegetado-Escala Logarítmica 2017-2018

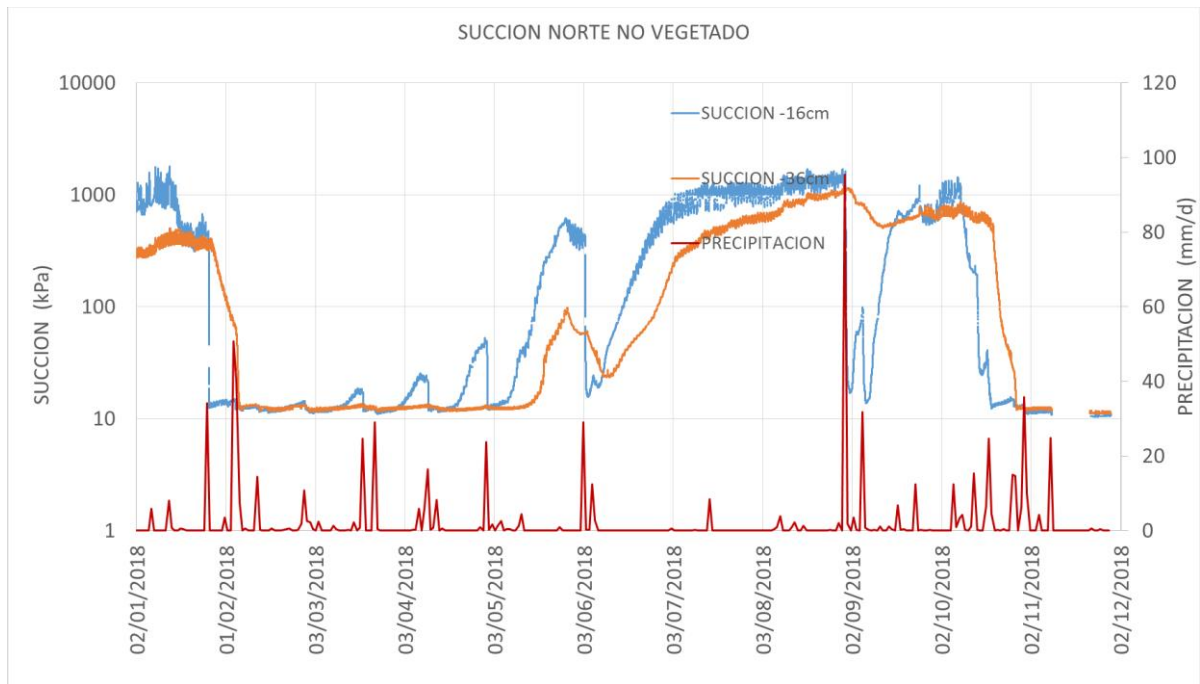


Fig. 13 Succión en el Suelo Talud Norte no Vegetado-Escala Logarítmica 2018

A partir de noviembre del 2017 la succión se incrementa en los sensores a 16 y 36 cm, siendo a menor profundidad la de mayor succión (Ver Fig. 12). Desde el 11 de enero del 2018 la succión a 16 y 36 cm baja a 16 y 25 kPa respectivamente hasta el 11 de mayo del 2018 debido a las constantes precipitaciones (Ver Fig. 13 y Fig. 14).

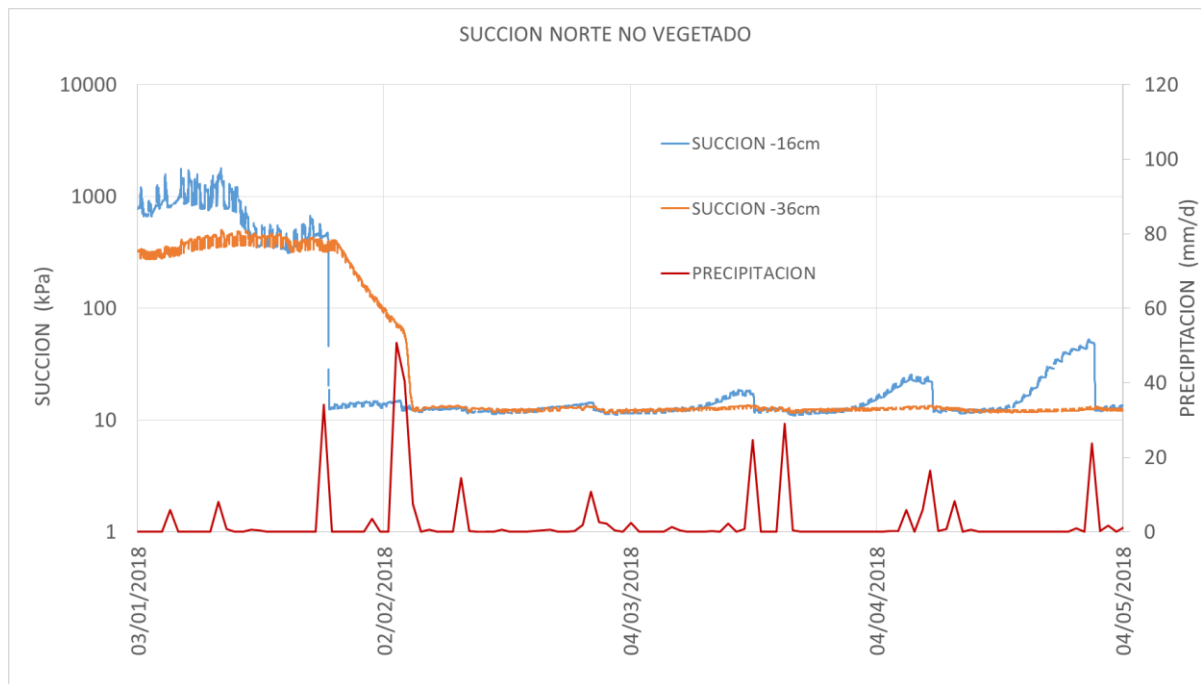


Fig. 14 Succión en el Suelo Talud Norte no Vegetado (Enero-Mayo 2018)

Después de mayo hasta finales de agosto del 2018 las temperaturas se elevan provocando que la succión también incremente a 1600 kPa (16cm) y 1100 kPa (36cm), siendo ligeramente mayor a menor profundidad y menor a mayor profundidad. A principios de septiembre del 2018 se observa que las precipitaciones afectan reduciendo la succión en ambas profundidades e inmediatamente vuelven a subir hasta principios de octubre del 2018 (Fig. 15). Finalmente desde mediados de octubre del 2018 nuevamente la succión desciende en ambas profundidades (Ver Fig. 13).

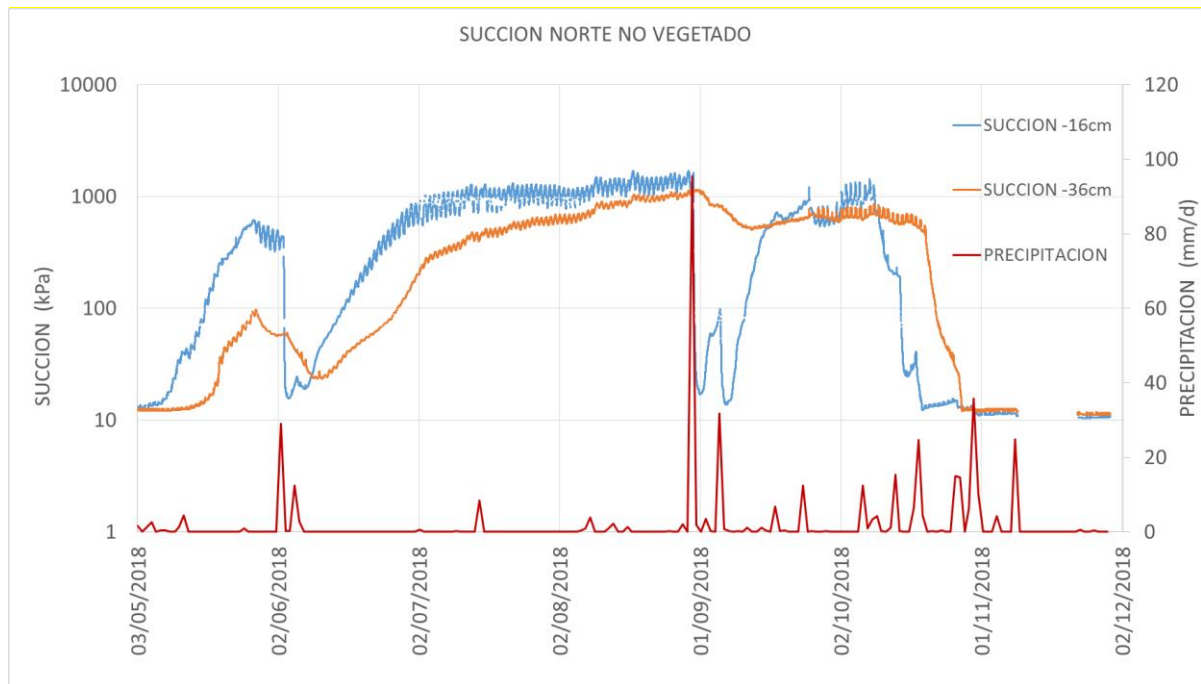


Fig. 15 Succión en el Suelo Talud Norte no Vegetado (Mayo-Octubre 2018)

3.1.2 Talud Norte Vegetado

3.1.2.1 Temperatura ambiente

Según el sensor Decagon ECRN-100 desde finales de noviembre del 2017 a principios de abril del 2018, la temperatura ambiente promedio es de 10 °C, máximos de 23 °C y con temperatura mínima de -1 °C a principio de enero del 2018 (Ver Fig. 16).

A partir de abril del 2018, la temperatura ambiente promedio sube hasta principios de julio, donde empieza una temporada promedio de 30 °C, máximos de 42 °C y temperaturas mínimas de 19 °C hasta finales de agosto del 2018. Desde principios de septiembre hasta principios de diciembre del 2018 la temperatura es descendente hasta 18 y 13 °C de promedio (Ver Fig. 16).

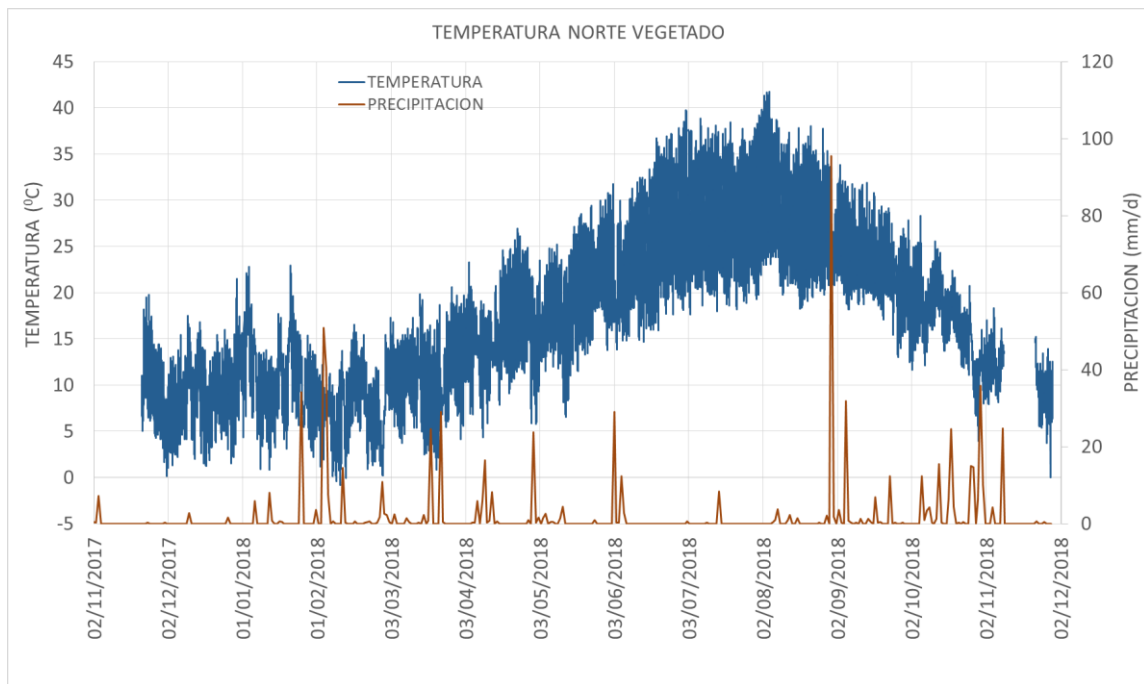


Fig. 16 Temperatura Ambiente Talud Norte Vegetado

3.1.2.2 Temperatura en el subsuelo

Según los sensores 5TE (SoilTemp NV) en la época de otoño, en general las temperaturas a mayor profundidad son más elevadas que a poca profundidad y esto se mantiene desde noviembre del 2017 hasta mediados de marzo del 2018, siendo la máxima 13 °C y la mínima 4 °C respectivamente (Ver Fig. 17).

En primavera las temperaturas se elevan y los sensores a menor profundidad de 6 y 16 cm superan las temperaturas a 36 y 56 cm, siendo las temperaturas de 41, 36, 32 y 30 °C respectivamente. Esto continúa hasta finales de agosto (finales de verano). A partir de agosto las temperaturas empiezan a bajar, existen precipitaciones elevadas y las temperaturas a mayor profundidad empiezan a superar a las de menor profundidad (Ver Fig. 17).

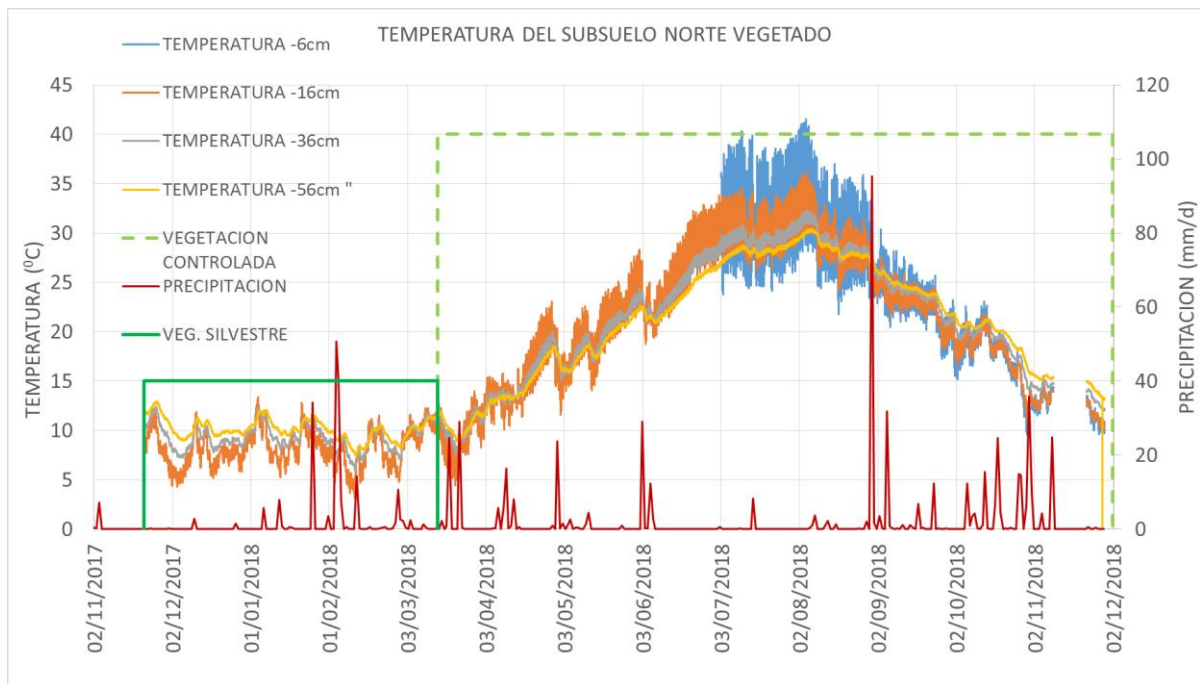


Fig. 17 Temperatura en el Suelo Talud Norte Vegetado

3.1.2.3 Contenido volumétrico de Agua

En la Fig. 18 se marca con verde línea continua la temporada con vegetación silvestre y con verde línea punteada con vegetación sembrada. Durante el verano del 2018 no existió con vegetación. Los sensores 5TE (NV_VWC) colocados a 6, 16, 36 y 56 cm de profundidad, desde mediados de Octubre del 2017 el contenido volumétrico de agua es descendiente y no existen precipitaciones relevantes salvo por dos días en enero del 2018 que eleva levemente el contenido volumétrico de agua (CVW). Se observa claramente que a partir del 26 de enero del 2018 se observa una precipitación de 34.2 a 51 mm/d que produce igualmente un incremento del contenido volumétrico hasta 0.25, 0.18 y 0.24 m^3/m^3 en los sensores a 56, 36 y 16 cm respectivamente. Hasta finales de abril del 2018 tiene un comportamiento similar de forma que asciende el contenido volumétrico de agua dependiendo de las precipitaciones y con una conducta donde a mayor profundidad existe mayor CVW, seguido de 16 cm y 36cm de profundidad.

Desde mayo del 2018 existe un cambio en el orden de contenido volumétrico de agua a diferentes profundidades, respecto al existente. El contenido volumétrico a 36 cm de

profundidad supera levemente al de 16cm en el mes de mayo del 2018, y a comienzos de junio cuando existen ciertas precipitaciones se eleva nuevamente el CVW de 16 cm superando al de todas las profundidades. A partir del 3 de julio del 2018, cuando se pone en funcionamiento un sensor adicional a 6 cm de profundidad, hasta finales de agosto existe un comportamiento uniforme y descendente debido a la época de verano donde el CVW en orden ascendente es a 16, 36, 6 y 56 cm de profundidad (Ver Fig. 18).

El CVW a mayor profundidad varía respecto a la precipitación solo si el agua llega a infiltrarse y no es evaporada. Es por esto que a partir de septiembre donde hay lluvias elevadas y también la temperatura es alta, los cambios relevantes se ven a menores profundidades. A partir de mediados de noviembre del 2018 el CVW a mayor profundidad supera a los de menor profundidad (Ver Fig. 18).

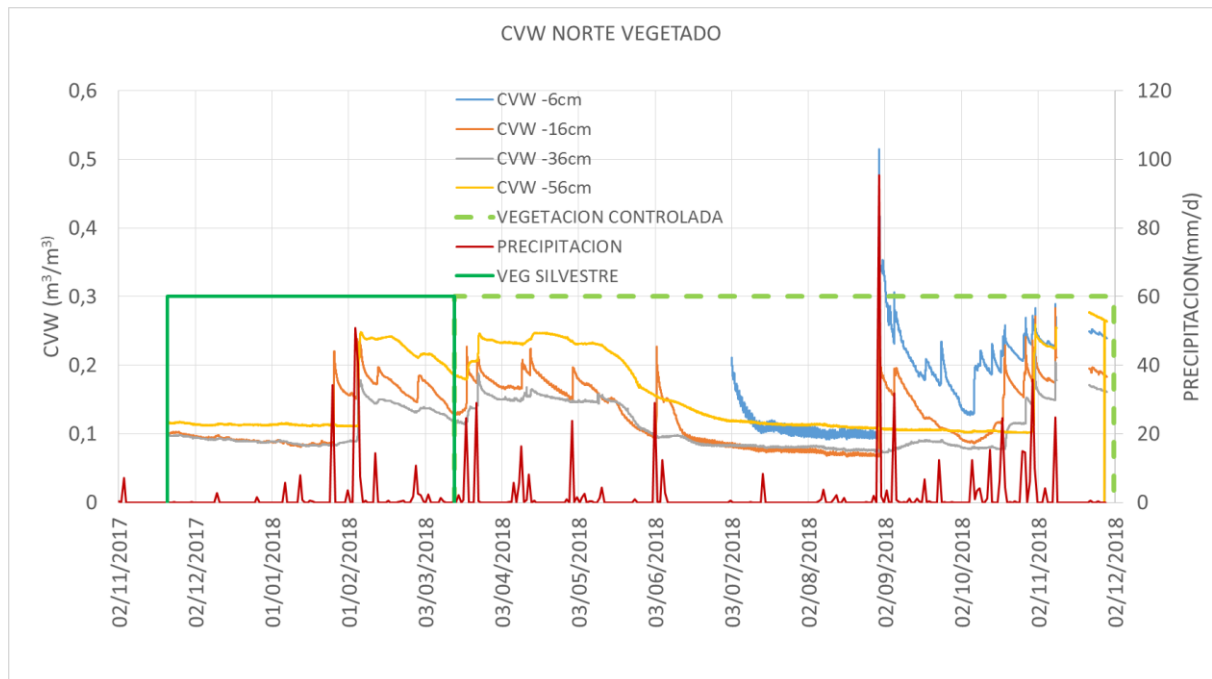


Fig. 18 Contenido Volumétrico de Agua del Talud Norte Vegetado

3.1.2.4 Succión

Según los sensores de succión MPS se observa que a partir de noviembre del 2017 la succión se incrementa en los sensores a 16, 36 y 56 cm, siendo a menor profundidad la de mayor succión, seguido de 56cm y 36cm de profundidad. A partir del 11 de enero del

2018 la succión a 36 y 56 cm son semejantes y a 16cm mayor, con valores de 600 y 1740 kPa respectivamente (Ver Fig. 19, Fig. 20 y Fig. 21).

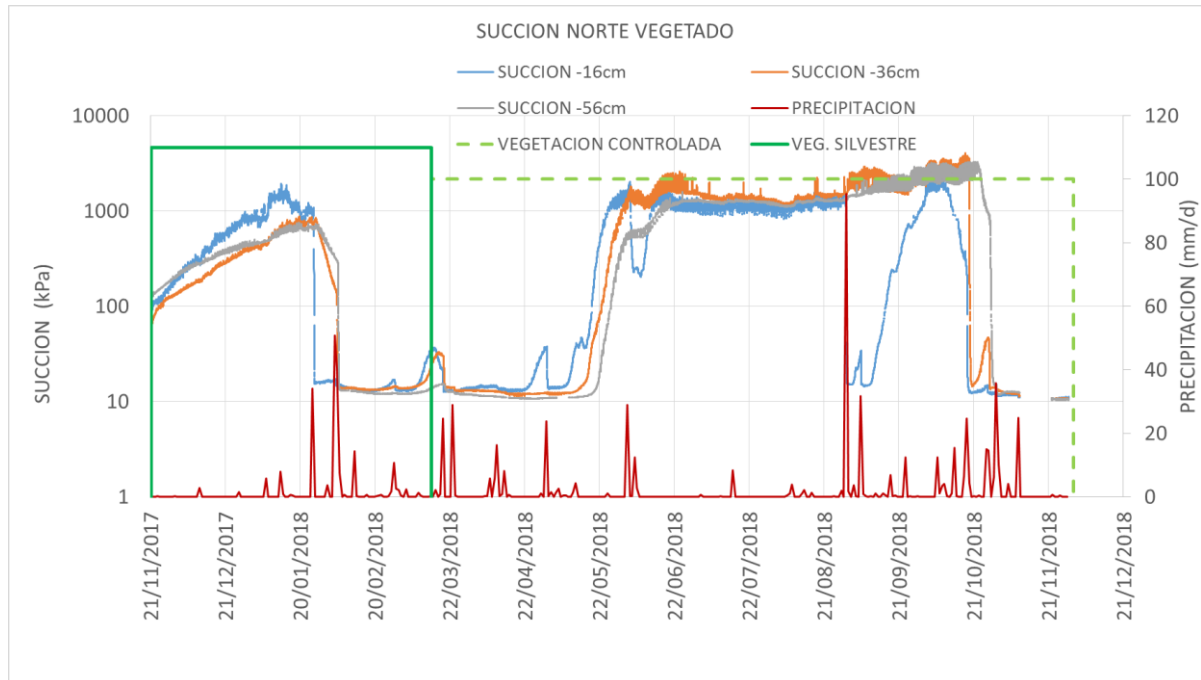


Fig. 19 Succión en el Suelo del Talud Norte Vegetado Escala Logarítmica 2017-2018

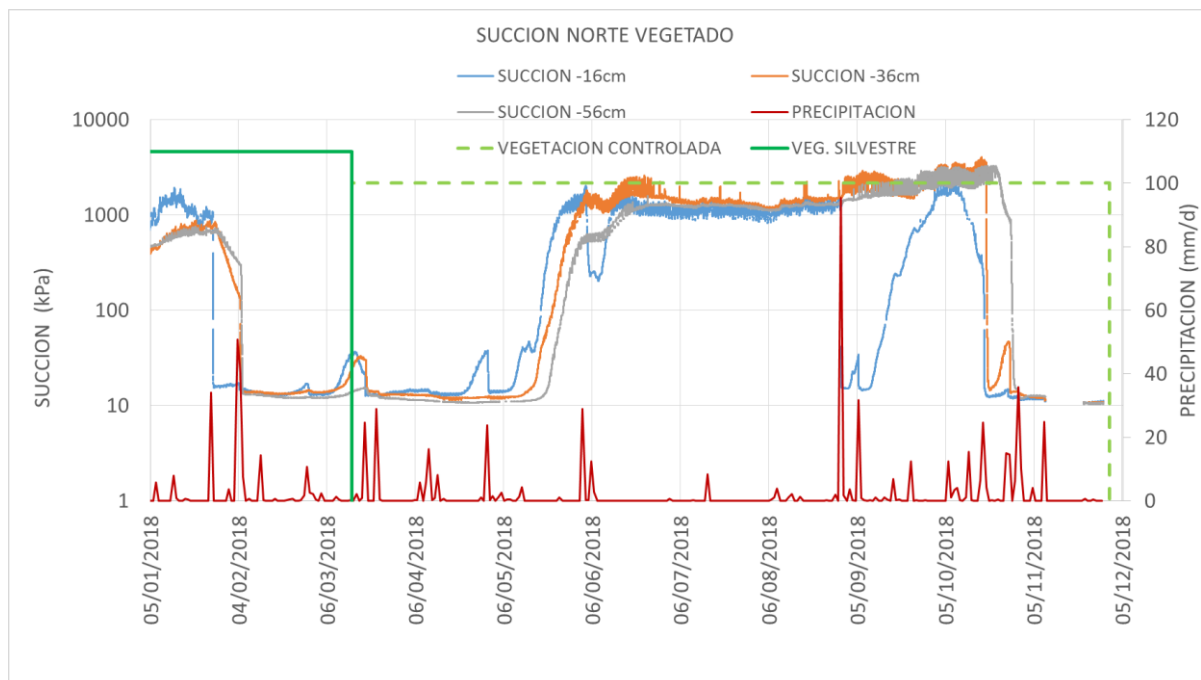


Fig. 20 Succión en el Suelo Talud Norte Vegetado Escala Logarítmica 2018

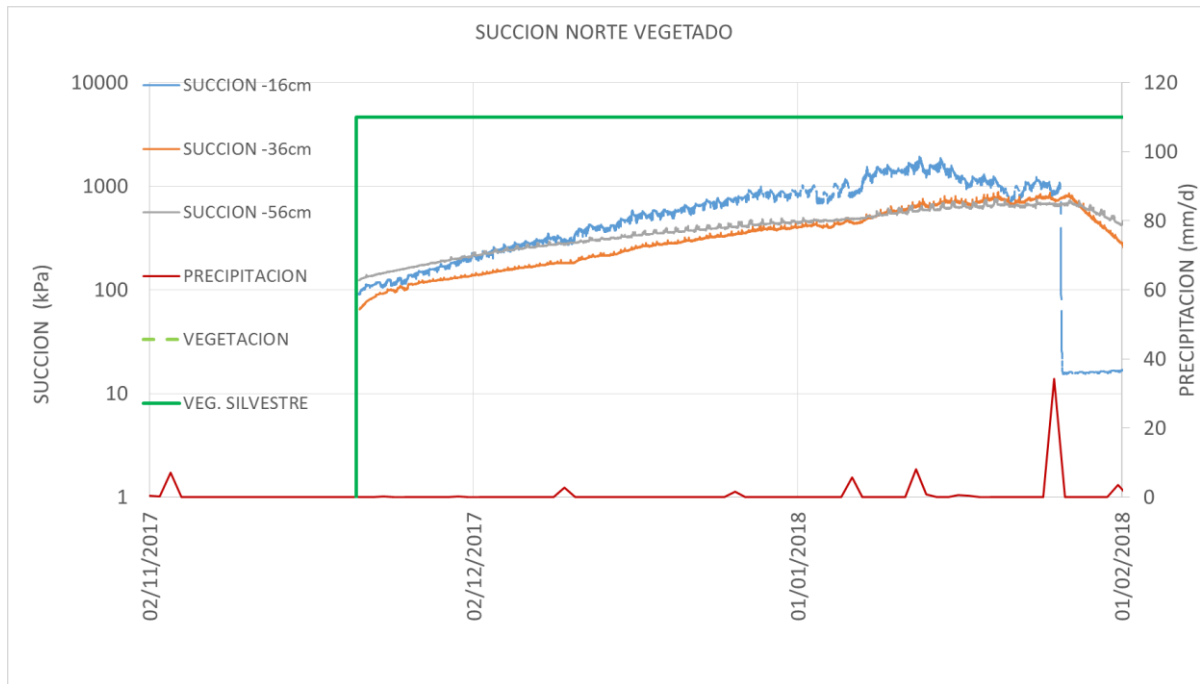


Fig. 21 Succión en el Suelo Talud Norte Vegetado (noviembre 2017-enero2018)

Desde enero hasta el 14 de mayo del 2018 las precipitaciones redujeron la succión de las profundidades 16, 36 y 56 cm a mínimos de 15, 13 y 11 kPa respectivamente (Ver Fig. 20 y Fig. 22).

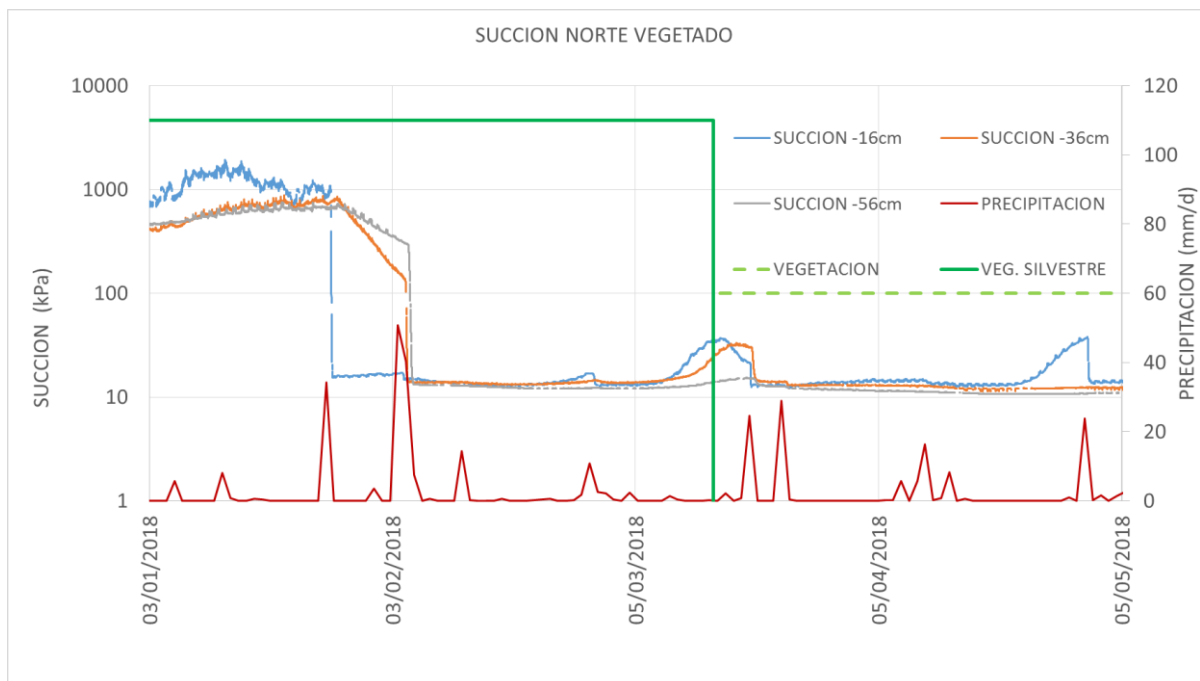


Fig. 22 Succión en el Suelo Talud Norte Vegetado

Después de mayo las temperaturas se elevan provocando que la succión también se eleve hasta principios de agosto donde se observa que las precipitaciones solo afectan a la capa superior de 16 cm de profundidad, donde la succión tiende a bajar. Por debajo de 36 y 56 cm dependiendo de la precipitación, el agua no logra infiltrar debido a la alta evaporación. A principios de septiembre precipitaciones elevadas reducen la succión a 16 cm de profundidad al mínimo mientras que a mayor profundidad no se ven afectadas, seguido de esto la temperatura sigue siendo elevada y continúan los sensores detectando succiones ascendentes (Ver Fig. 20 y Fig. 23).

A partir de octubre del 2018 las precipitaciones saturan todo el material, llevando la succión al mínimo valor del rango de medida de los sensores (Ver Fig. 20).

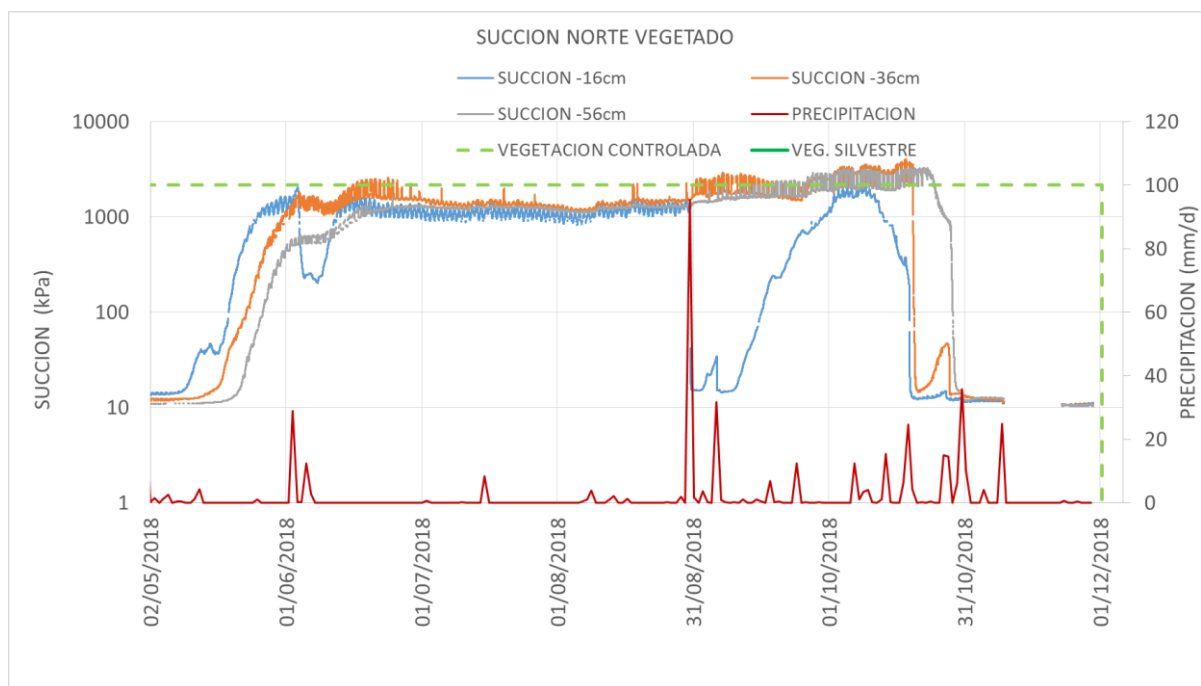


Fig. 23 Succión en el Suelo Talud Norte Vegetado (mayo-agosto 2018)

3.1.3 Talud Sur No Vegetado

3.1.3.1 Temperatura ambiente

Según el sensor Decagon ECRN-100 y como se indica en Fig. 24 desde marzo del 2017 la temperatura promedio es de 15 a 13 °C y a partir de mayo hasta principios de junio del

2017 es ascendente hasta 20 °C promedio. Seguido de esta fecha se tiene una temperatura media de 25 °C, máximos de 37 °C y mínimas de 14 °C hasta principios de septiembre del 2017. Desde septiembre del 2017 las temperaturas son descendientes de 25 a 10 °C promedio hasta principios de diciembre del 2017. Desde diciembre del 2017 a principios de marzo del 2018, la temperatura ambiente promedio es de 10 °C, máximos de 27 °C y mínimas de 0 °C.

A partir de marzo del 2018, la temperatura ambiente promedio sube hasta principios de julio, donde empieza una temporada de 27 °C promedio, máximos de 40 °C y temperaturas mínimas de 18 °C hasta finales de agosto del 2018 aproximadamente (Ver Fig. 24).

Desde principios de septiembre hasta principios de diciembre del 2018 la temperatura es descendente hasta 10 °C promedio.

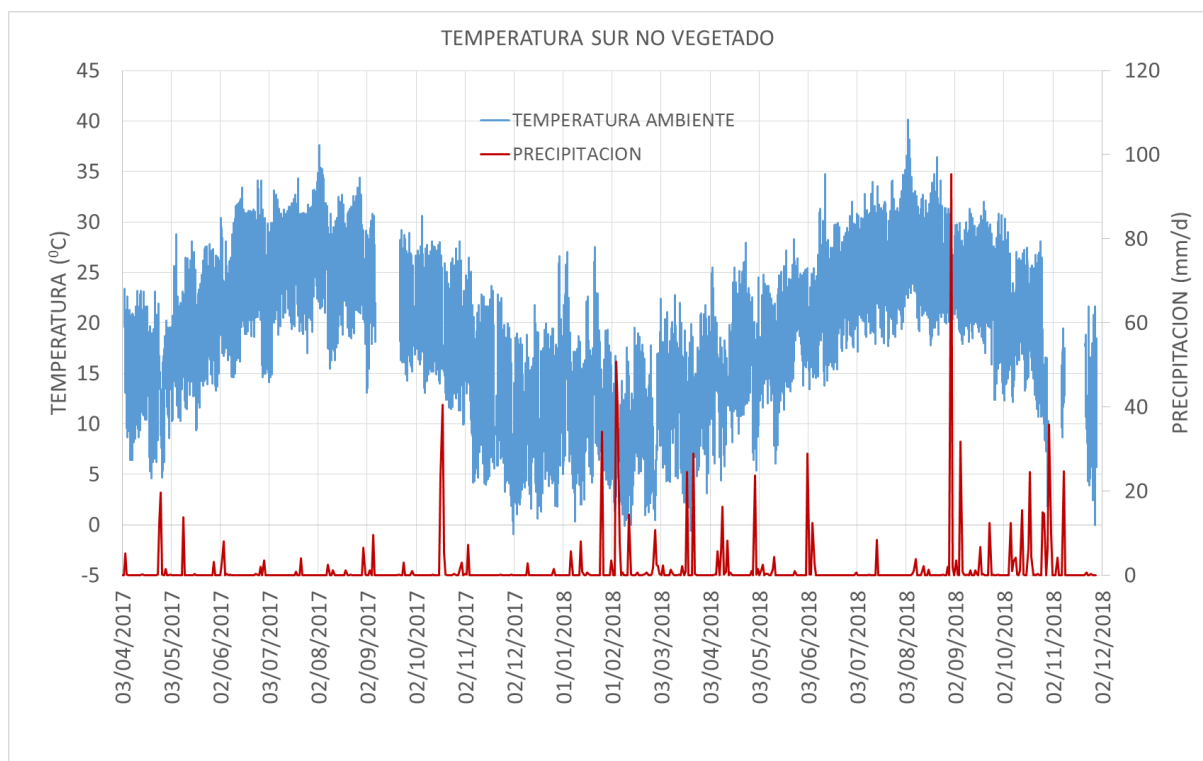


Fig. 24 Temperatura Ambiente Talud Sur no Vegetado

3.1.3.2 *Temperatura en el subsuelo*

Según los sensores 5TE (SoilTemp SnV) desde finales de marzo del 2017 hasta mediados de julio del 2017 la temperatura es ascendente, donde a menor profundidad la temperatura es mayor y va en orden descendente a mayor profundidad. A partir de julio hasta mediados de agosto del 2017 la temperatura a 16, 36 y 56 cm de profundidad tiene máximos de 39, 34 y 30 °C respectivamente. Desde mediados de agosto hasta principios de diciembre del 2017 las temperaturas son decrecientes y pasan las temperaturas de menor profundidad a ser menor que a mayor profundidad. El sensor a 16 cm de profundidad tiene mucha variación pero si se observan únicamente los de 36 y 57 cm de profundidad a partir de diciembre las temperatura son de 14 y 15 °C promedio hasta principios de marzo del 2018 (Invierno) (Ver Fig. 25).

En primavera del 2018 las temperaturas se elevan y los sensores a menor profundidad de 16 cm superan las temperaturas a 36 y 56 cm, llegando a una media de 32, 30 y 29 °C respectivamente, esto continúa hasta finales de agosto del 2018 (finales de verano) con un sensor más a 6 cm de profundidad con máximos de 46 °C y a 16, 36 y 56 cm de profundidad máximos de 39, 35 y 33 °C. A partir de agosto hasta principios de diciembre las temperaturas empiezan a bajar y las temperaturas a mayor profundidad empiezan a superar a las de menor profundidad (Ver Fig. 25).

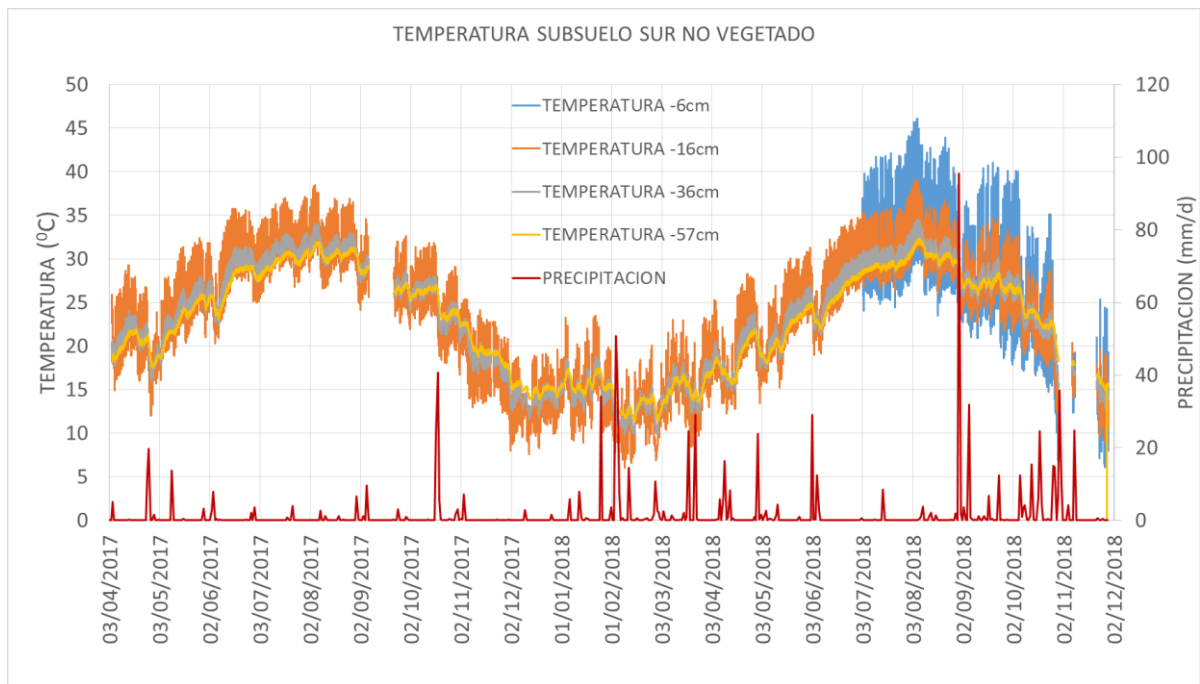


Fig. 25 Temperatura en el Suelo Talud Sur no Vegetado

3.1.3.3 Contenido volumétrico de Agua

Según los Slopes Sensors 5TE (SnV_VWC) colocados a 16, 36 y 57 cm de profundidad desde finales de marzo hasta finales de abril del 2017 el contenido volumétrico de agua (CVW) se mantiene en un rango de 0.25, 0.2 y 0.26 m^3/m^3 respectivamente. Desde finales de abril del 2017 el CVW sube levemente y decrece hasta mediados de junio. A partir de mediados de junio del 2017 desciende con una mayor pendiente, donde los valores del CVW a las profundidades de 16, 36 y 56 cm llegan a ser de 0.20, 0.15 y 0.17 m^3/m^3 respectivamente. Aunque levemente presenta un cambio donde a la profundidad de 56cm el CVW decrece por debajo de los 16 cm de profundidad, a partir de mediados de julio del 2017 vuelve a estar por encima de los 16 cm de profundidad (Ver Fig. 26).

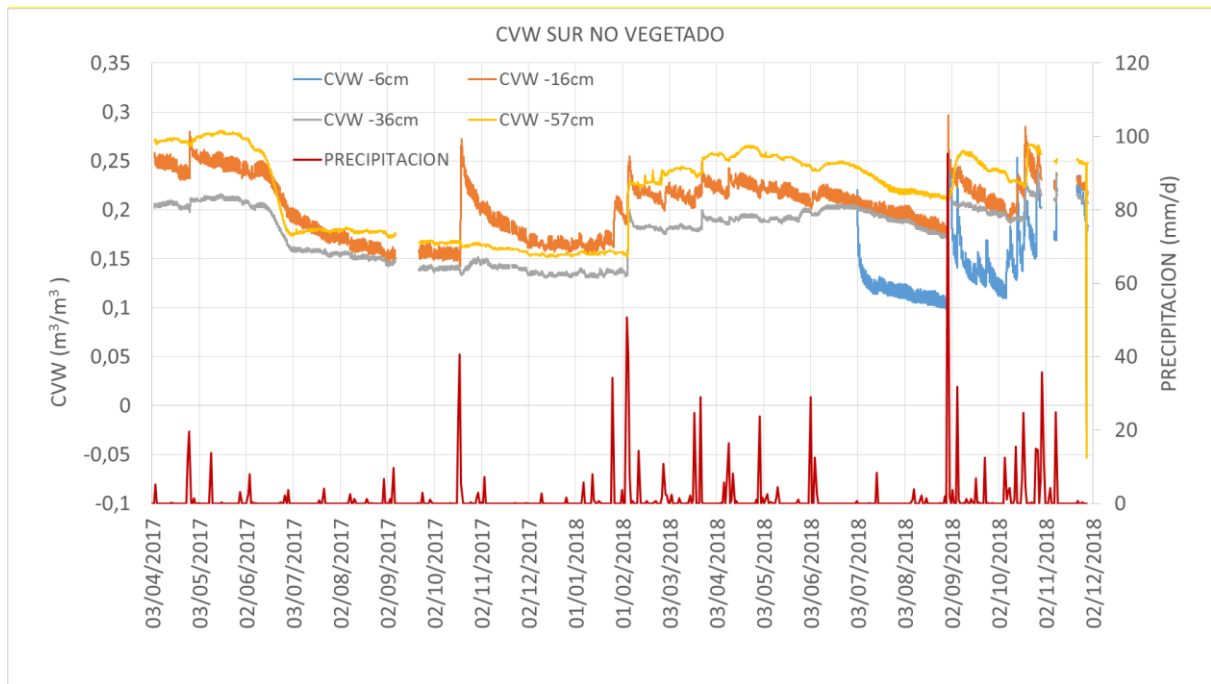


Fig. 26 Contenido Volumétrico de Agua Talud Sur no Vegetado (2017-2018)

Desde mediados de julio el CVW es descendiente en el mismo orden, donde existen precipitaciones pero no relevantes para provocar un cambio importante en el CVW hasta el 18 de septiembre del 2017 que se presenta una precipitación de 23.4 mm/d y al día siguiente de 41 mm/d que provoca un cambio ascendente en el CVW de 0.27 m³/m³ a 16 cm de profundidad mientras que a mayor profundidad tiene un mismo comportamiento (Ver Fig. 27).

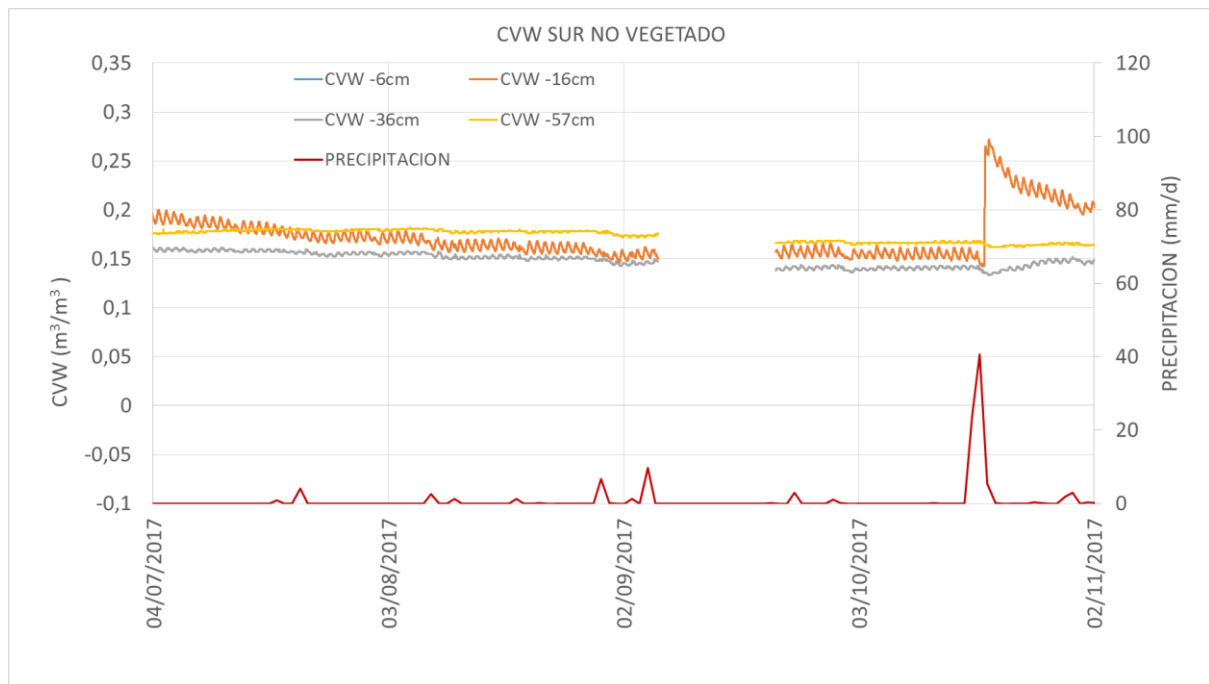


Fig. 27 Contenido Volumétrico de Agua Talud Sur no Vegetado (julio-octubre 2017)

Se visualiza en la Fig. 28 que a 16 cm de profundidad, desde mediados de Octubre del 2017 el contenido volumétrico de agua es descendiente del orden de $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Se supone que las lluvias constantes han saturado el suelo y a partir del 26 de Enero del 2018 existe una precipitación de 34.2 a 51 mm/d que produce un incremento promedio del CVW de 0.07 a $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en todas las profundidades. Hasta finales de abril del 2018 tiene un comportamiento similar que asciende el CVW dependiendo de las precipitaciones y con una conducta donde a 56 cm de profundidad se tiene mayor CVW, seguido de 16 y 36 cm de profundidad.

Desde principios de mayo del 2018, la temperatura es ascendente y provoca un comportamiento inverso en el CVW excepto por la profundidad a 36cm, llegando a igualar el CVW a la profundidad de 16 cm hasta principios de Julio del 2018, donde también se incorpora un sensor a 6 cm de profundidad. Existen ciertas precipitaciones a principio de septiembre del 2018 que eleva nuevamente el CVW con mayor agresividad a los de menor profundidad y levemente a los de mayor profundidad. A mediados de septiembre del 2018 el CVW es descendiente debido a la época de verano excepto por el sensor a 6cm de profundidad que es más sensible a las precipitaciones (Ver Fig. 28).

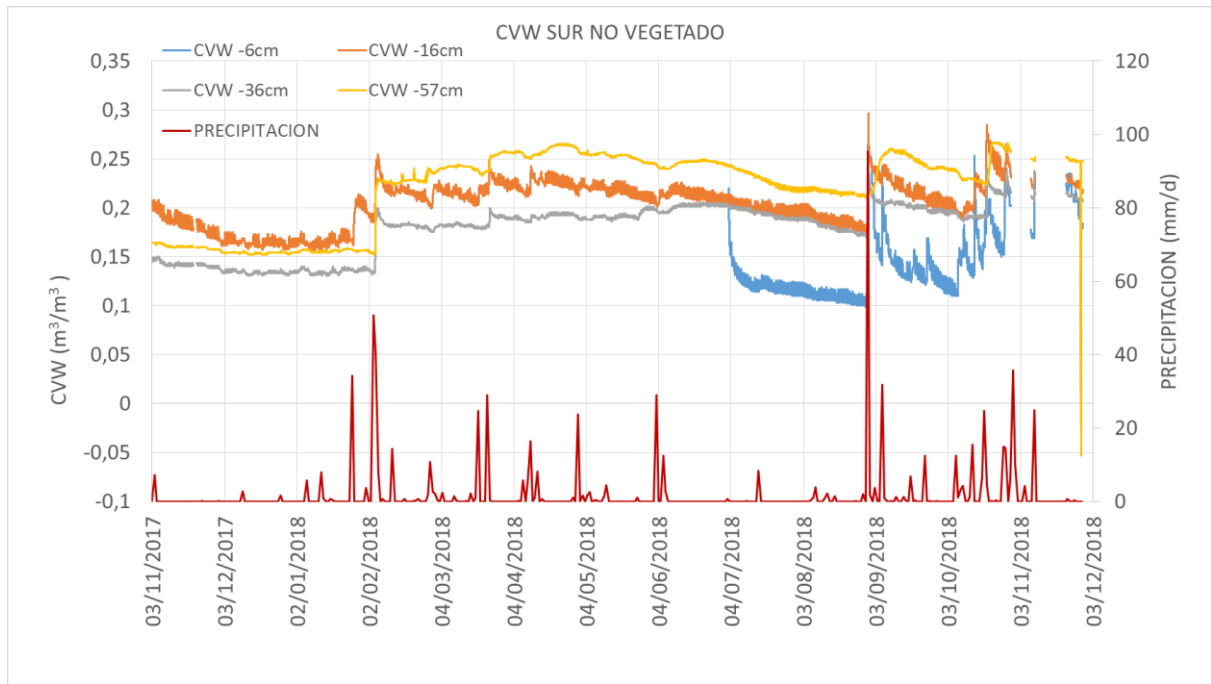


Fig. 28 Contenido Volumétrico de Agua Talud Sur no Vegetado (octubre 2017-diciembre2018)

3.1.3.4 Succión

Según los sensores MPS_raw (SnV) se observa en la Fig. 29 que desde el 28 de marzo hasta principios de julio del 2017 la succión es ascendente siendo mayor a 11 cm que a 32 cm de profundidad llegando a 1100 y 900 kPa respectivamente. A partir del 18 y 19 octubre del 2017 donde se detectan precipitaciones de 23.4 y 40 mm/d provoca que la succión a 16cm de profundidad descienda bruscamente a 10 kPa y a 36cm cm de profundidad baje a 500kPa. Seguido de la ausencia de precipitaciones relevantes la succión de 16 cm de profundidad asciende a 3800 kPa y la de 36cm de profundidad a 2000 kPa. En el mes de enero del 2018 las precipitaciones llegan a saturar el subsuelo y a principios de febrero del 2018 la succión baja a 10 kPa en ambas profundidades. Hasta mediados de mayo del 2018 únicamente a 16cm de profundidad la succión baja o sube dependiendo de la precipitación hasta máximos de 60 kPa y mínimos de 10kPa. Después de mediados de mayo del 2018 las temperaturas elevadas provocan la evaporación del CVW a mayor profundidad y la succión a 16 y 32 cm se eleva llegando a su máxima succión a finales de agosto del 2018 de 1000 y 600 kPa respectivamente.

A partir de septiembre del 2018 las precipitaciones son elevadas y provocan que la succión a 16 y 36 cm de profundidad decrezca a 12 y 15 kPa mínima lectura de los sensores. (Ver Fig. 29).

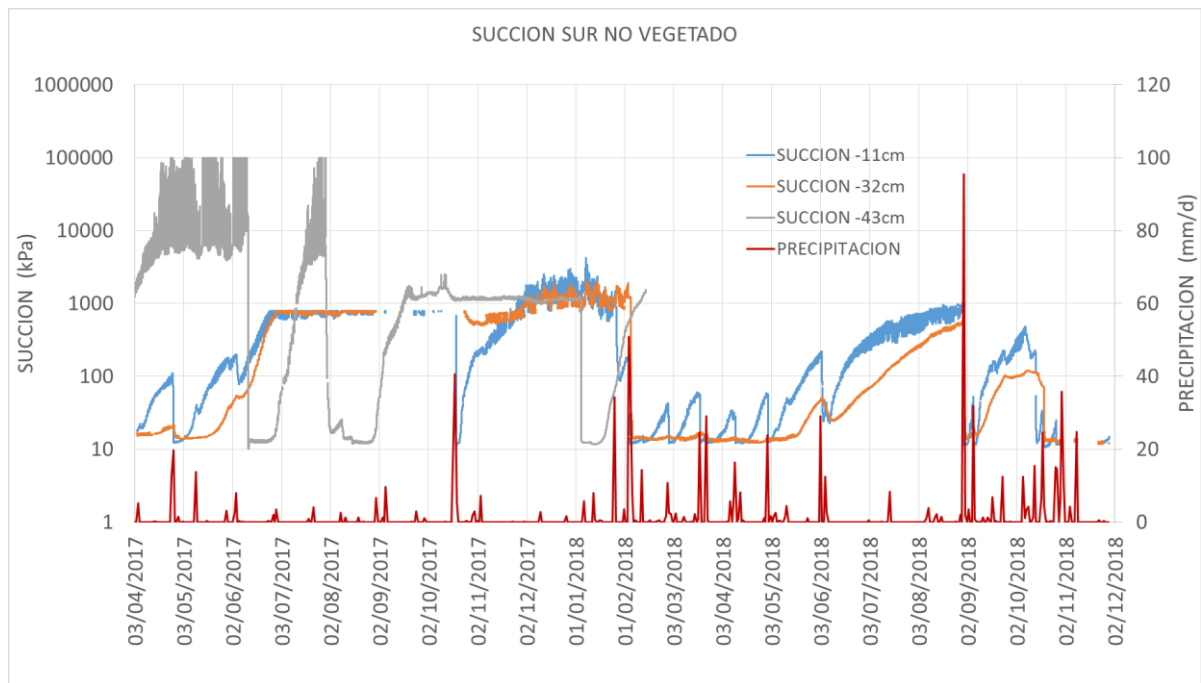


Fig. 29 Succión en el Suelo Talud Sur no Vegetado-Escala Logarítmica

3.1.4 Talud Sur Vegetado

3.1.4.1 Temperatura ambiente

Según el sensor Decagon ECRN-100 desde finales de Noviembre del 2017 a principios de Abril del 2018, la temperatura ambiente promedio es de 10 °C, máximos de 27 °C y con temperaturas mínimas de -1 °C (Ver Fig. 30).

A partir de abril del 2018, la temperatura ambiente promedio sube hasta principios de julio, donde empieza una temporada promedio de 25 °C, máximos de 42 °C y temperaturas mínimas de 19 °C hasta finales de agosto del 2018. Desde principios de septiembre hasta principios de diciembre del 2018 la temperatura es descendente hasta una media de 10 °C (Ver Fig. 30).

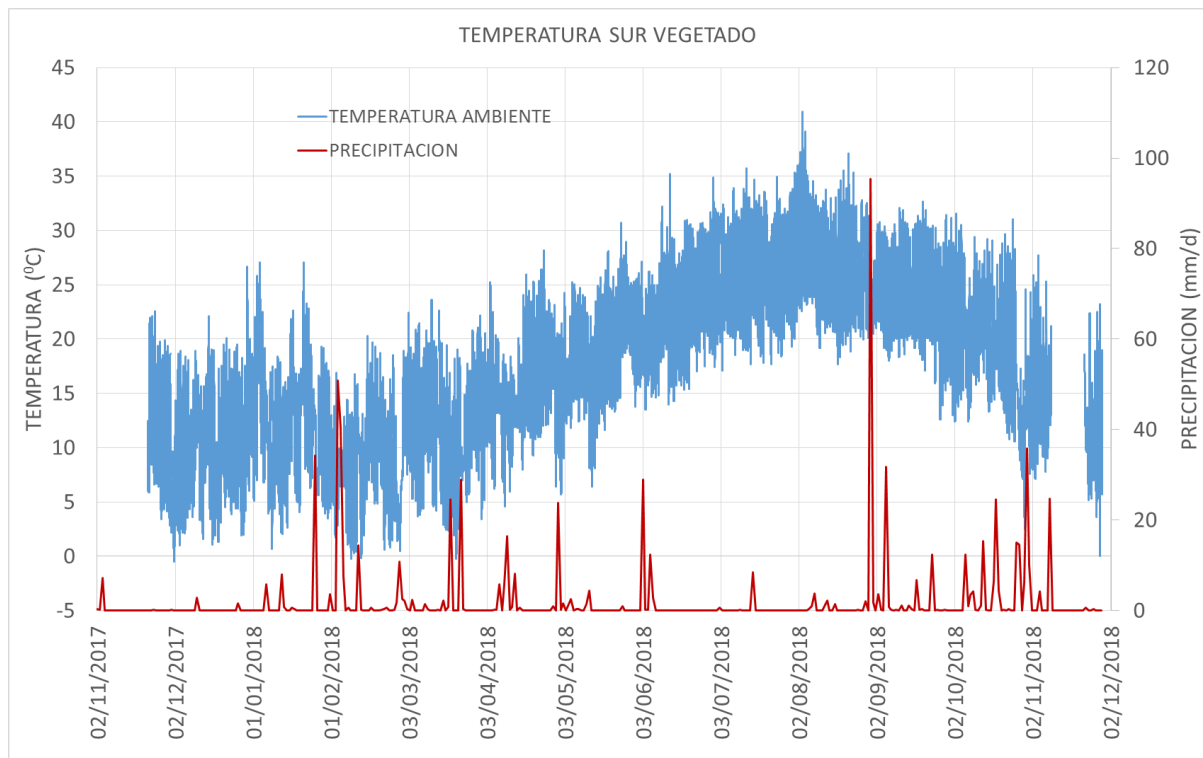


Fig. 30 Temperatura Ambiente Talud Sur Vegetado

3.1.4.2 Temperatura en el subsuelo

Según los sensores 5TE (SoilTemp SV) en la época de otoño, en general las temperaturas a mayor profundidad tiene más similitud con una media de 15 °C y a poca profundidad tienen temperaturas máximos de 28 °C a 6cm, 24 °C a 16cm y mínimas de 7 °C a 6 cm y 8 °C a 16cm, esto se mantiene hasta invierno (mediados de marzo del 2018) (Ver Fig. 31).

En primavera las temperaturas se elevan y los sensores a menor profundidad de 6 y 16 cm superan las temperaturas a 36 y 56 cm, siendo las temperaturas de 38, 32, 39 y 28 °C respectivamente hasta principios de julio del 2018. En julio y agosto del 2018 el sensor muestra datos más elevado de temperatura (finales de verano) y partir de agosto del 2018 la temperatura empieza a bajar. A partir de mediados de septiembre hasta principios de diciembre del 2018 existen precipitaciones elevadas y las temperaturas a mayor profundidad empiezan a superar a las de menor profundidad (Ver Fig. 31).

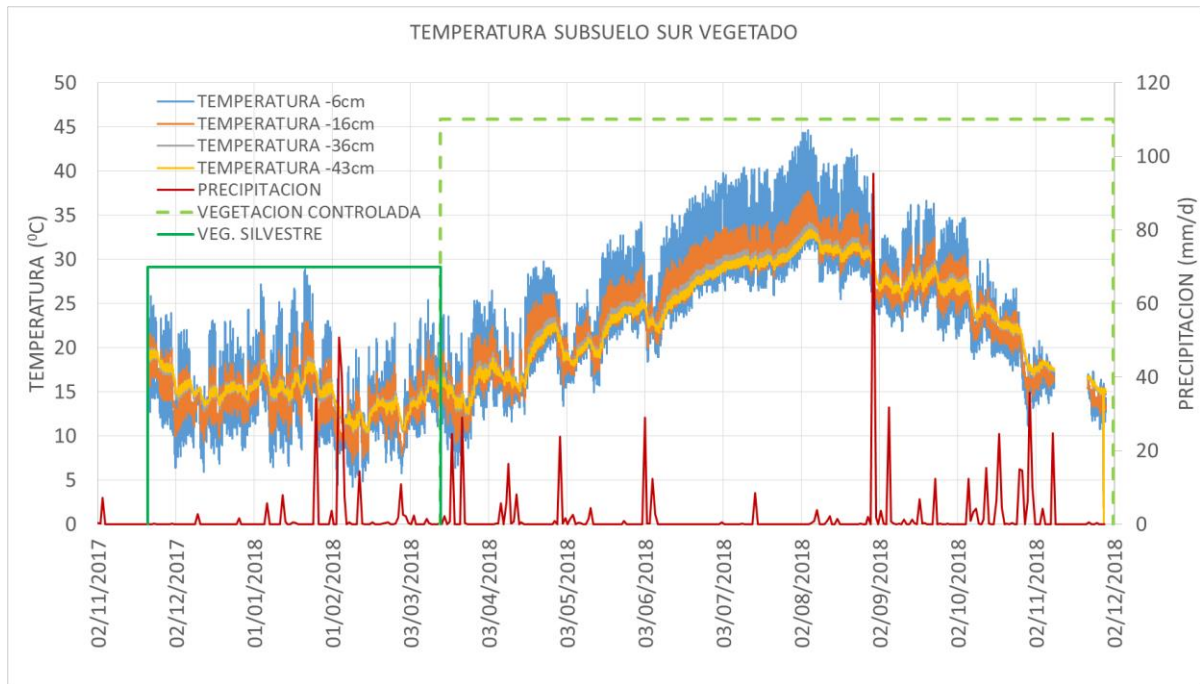


Fig. 31 Temperatura en el Suelo Talud Sur Vegetado

3.1.4.3 Contenido volumétrico de Agua

En la Fig. 32 se marca con verde línea continua la temporada con vegetación silvestre y con verde línea punteada con vegetación sembrada. Según los sensores 5TE (SV_VWC) colocados a 6, 16, 36 y 43 cm de profundidad, desde mediados de Octubre del 2017 el contenido volumétrico de agua (CVW) es descendiente y no existen precipitaciones relevantes salvo por dos días en enero, cuando se eleva levemente el contenido volumétrico de agua. Se observa claramente que a partir del 26 de enero del 2018 existe una precipitación de 34.2 y 51 mm/d que produce igualmente un incremento del contenido volumétrico a 0.2, 0.17, 0.07 y 0.08 m^3/m^3 en los sensores a 6, 16, 36 y 43 cm de profundidad respectivamente. Seguido de este suceso a principios de febrero del 2018 se observa una precipitación del orden de 50.8 mm/d que eleva el CVW provocando que a mayor profundidad supere el CVW de menor profundidad, visualizando valores de 0.33 m^3/m^3 a 43 cm y de 0.22 m^3/m^3 a 6cm. Hasta mediados de marzo se observa un comportamiento descendente y similar en el orden de CVW, de forme que asciende el contenido volumétrico de agua dependiendo de las precipitaciones y con una conducta donde a mayor profundidad existe mayor CVW, seguido de 16, 36 y 6cm de profundidad.

Existe un cambio en el orden de contenido volumétrico de agua a diferentes profundidades, respecto a lo que llevaba pasando anteriormente. El contenido volumétrico a 6 y 16 cm de profundidad supera levemente al de 36 y 43cm desde mediados de marzo hasta mediados de junio del 2018. Desde mediados de junio del 2018 la única capa en la que el CVW está por debajo de las capas más profundas es la de 6 cm y todos los sensores muestran un comportamiento descendiente (Ver Fig. 32).

En la época de verano el CVW a mayor profundidad tendrá sus valores mínimos y dependerá del tiempo de infiltración para que cambien con mayor sensibilidad como los de menor profundidad. Es por esto que a partir de septiembre donde hay lluvias elevadas y también la temperatura es alta, los cambios se ven en todas las profundidades de 6, 16, 36 y 43 cm alcanza valores en el orden de 0.3, 0.26, 0.17 y 0.27 m^3/m^3 respectivamente (Ver Fig. 32).

A partir de mediados de septiembre del 2018 hasta principios de diciembre, el CVW en todas las capas es descendente y a mayor profundidad mayor contenido volumétrico de agua que a menor profundidad (Ver Fig. 32).

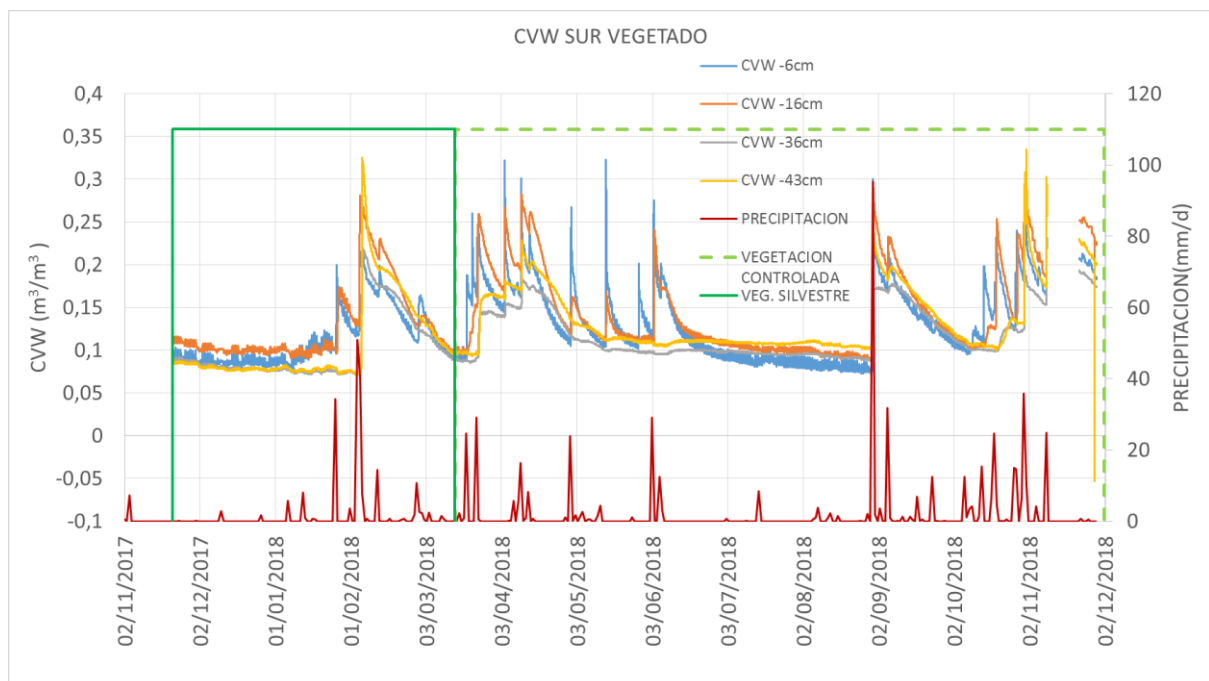


Fig. 32 Contenido Volumétrico de Agua Talud Sur Vegetado

3.1.4.4 Succión

Según Slope Sensor MPS_raw (SV) se observa que a partir de noviembre del 2017 la succión se incrementa en las profundidades de 16, 36 y 56 cm. A partir de febrero del 2018 se producen grandes precipitaciones que bajan primero la succión a 16cm de profundidad y luego la succión de 36 y 56 cm a 10 kPa. A partir de febrero y mediados de marzo del 2018 la succión sube a valores de 100000 kPa a 16, 36 y 43 cm de profundidad respectivamente. Desde esta fecha hasta el 14 de abril del 2018 las precipitaciones redujeron la succión de en todas las profundidades a mínimos de 12kPa (Ver Fig. 33).

Después de junio del 2018 las temperaturas se elevan y provocan succiones del orden de los 1000 y 1300 kPa. A principios de septiembre del 2018 precipitaciones elevadas reducen la succión de todas las profundidades al mínimo y a 16 cm de profundidad levemente por encima de la succiones de mayor profundidad, seguido de esto la temperatura sigue siendo elevada y continúan los sensores detectando succiones ascendentes. A mediados de octubre hasta principios de diciembre del 2018 las precipitaciones actúan con mucha sensibilidad sobre la succión (Ver Fig. 33).

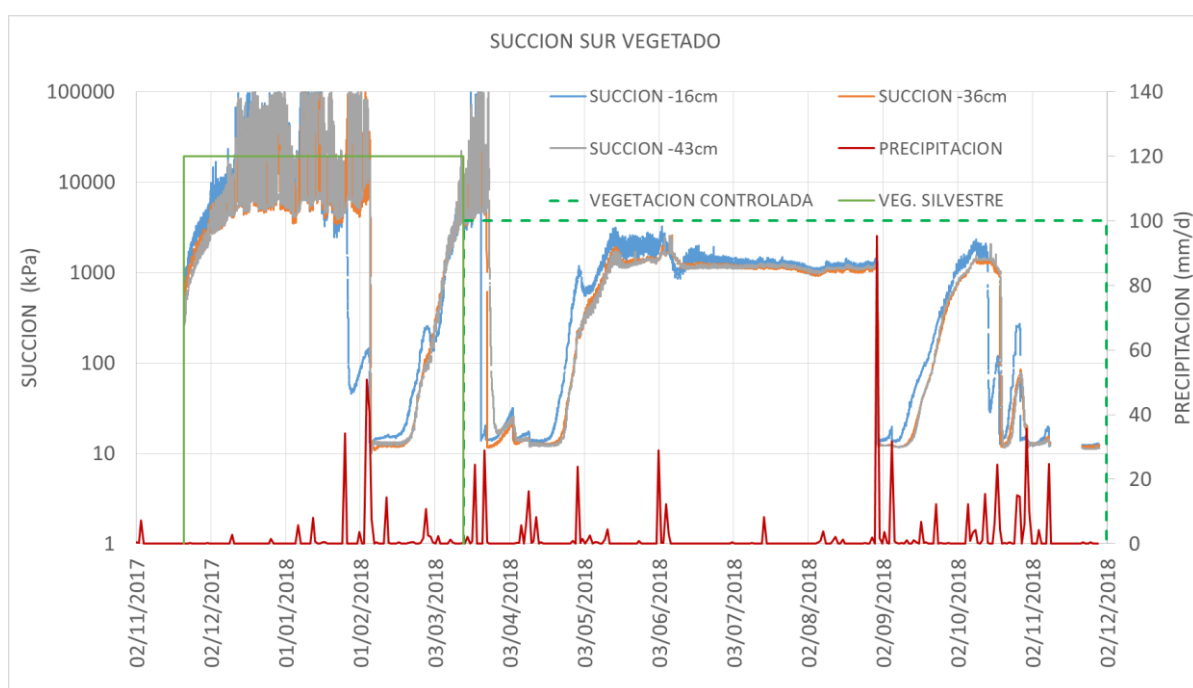


Fig. 33 Succión en el Suelo Talud Sur Vegetado Escala Logarítmica

3.2 Análisis comparativo

3.2.1 Norte Vegetado-No Vegetado

3.2.1.1 Contenido Volumétrico de Agua

Tomando en cuenta el lado norte, en la Fig. 34 se visualiza que el contenido volumétrico de agua (CVW) a 6 cm de profundidad del lado vegetado es mayor que el lado no vegetado y de forma particular del lado vegetado una vez que ha logrado disminuir su CVW al mínimo y se presenta una precipitación, el incremento del CVW también es mayor, presentando un comportamiento de mayor permeabilidad en el suelo con vegetación. La evolución es muy similar tras un periodo sin lluvias los dos valores tienden a ser iguales.

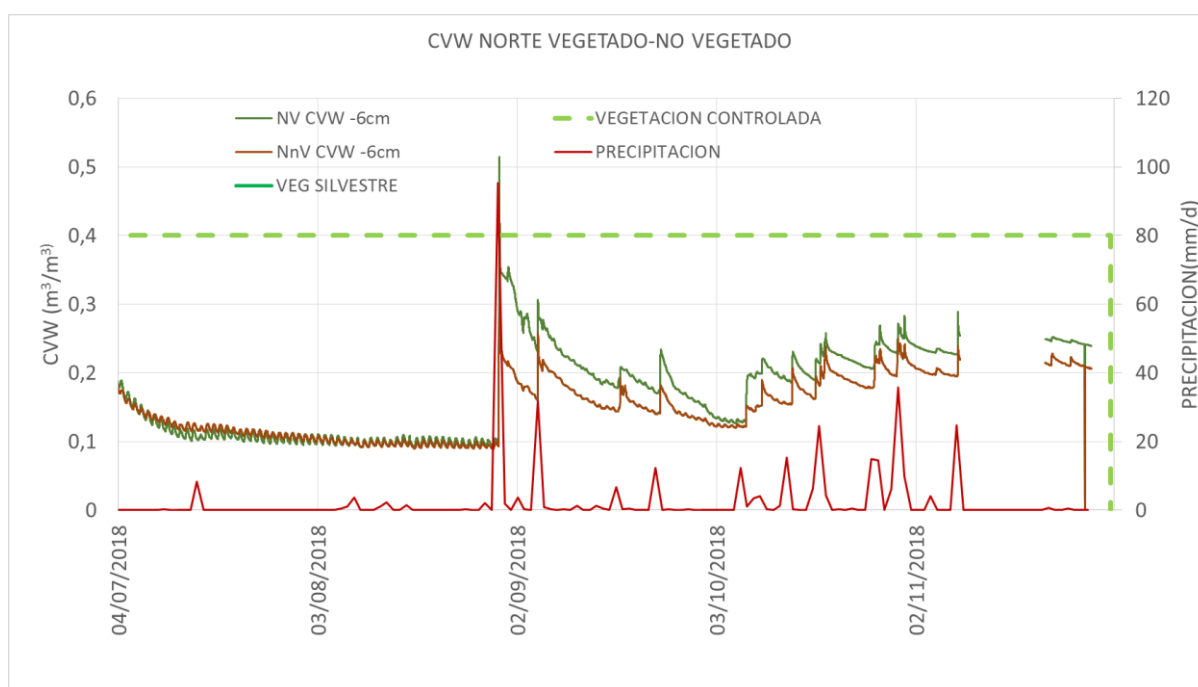


Fig. 34 Lado Norte CVW a 6cm de profundidad vegetado y no vegetado (otoño 2018)

La evolución es similar. Diferencias mayores que en los sensores de 6cm de profundidad. Tomando en cuenta el lado norte, en la Fig. 35 se visualiza que el contenido volumétrico de agua (CVW) a 16 cm de profundidad del lado vegetado es menor que el lado no vegetado y de forma particular del lado vegetado los incrementos de CVW son mayores que en el lado no vegetado y muchas veces llegan a superar el CVW final del lado no

vegetado. En tramos de secado el CVW del lado vegetado baja con mayor pendiente que el lado no vegetado. Por lo tanto el suelo vegetado presenta un comportamiento de mayor permeabilidad y de mayor velocidad de reducción de CVW en los mismos tramos de tiempo que el suelo no vegetación.

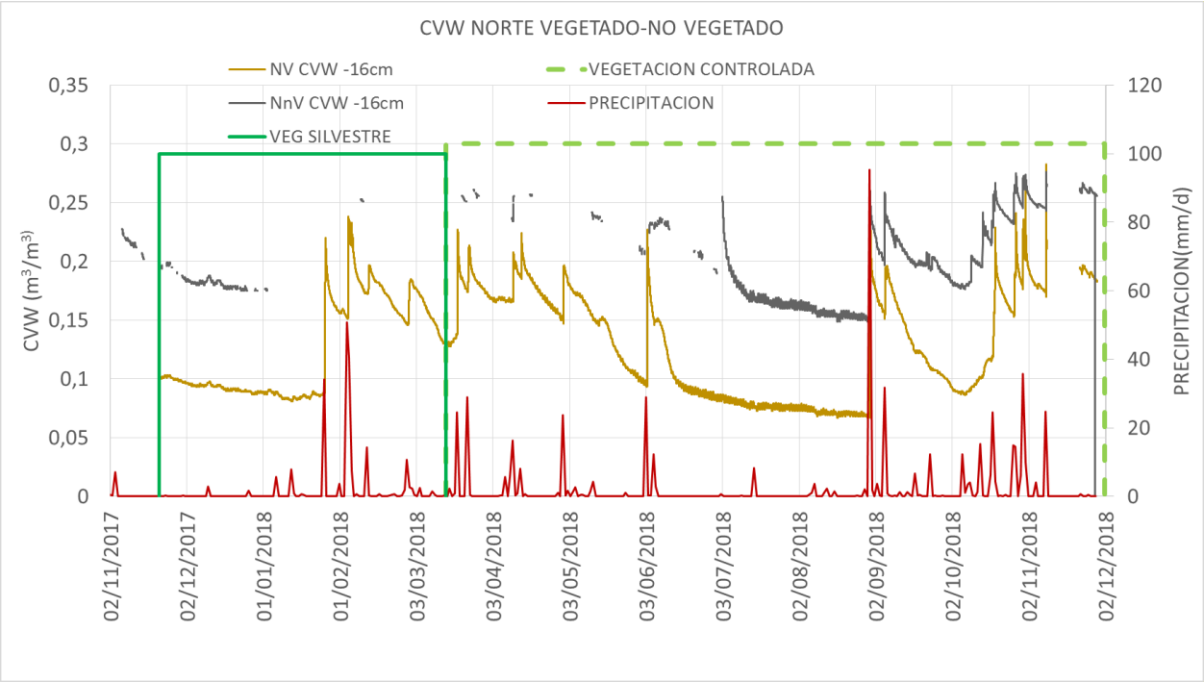


Fig. 35 Lado Norte CVW a 16cm de profundidad vegetado y no vegetado

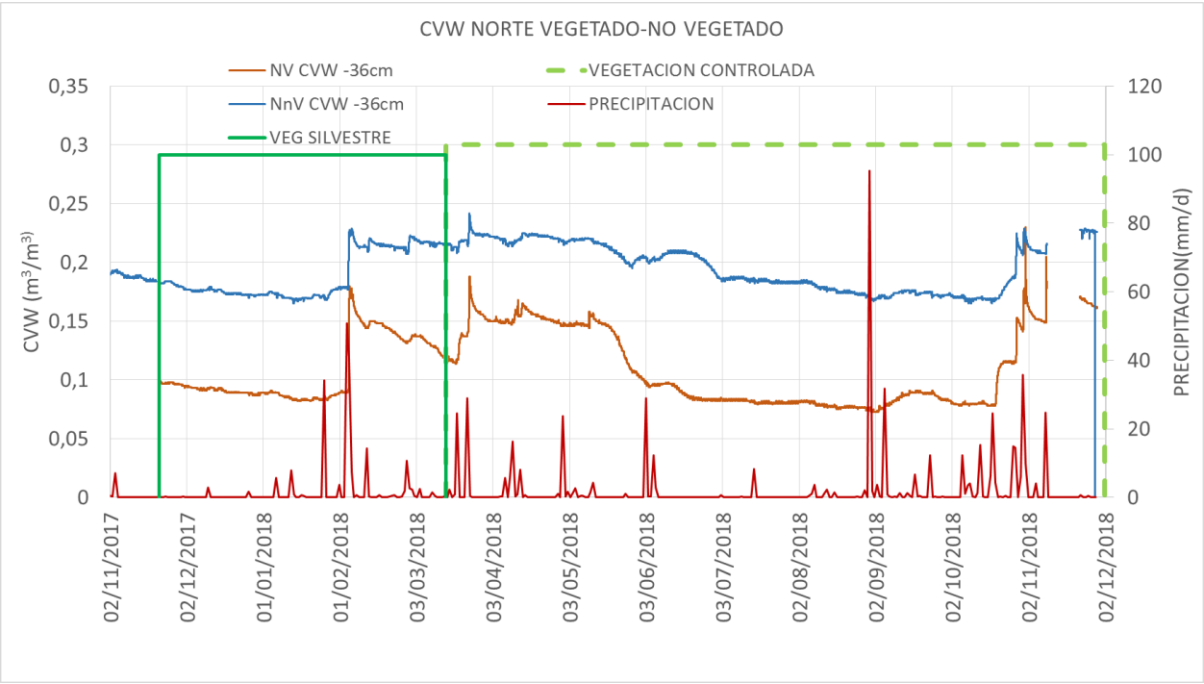


Fig. 36 Lado Norte CVW a 36cm de profundidad vegetado y no vegetado

Tomando en cuenta el lado norte, en las Fig. 36 y Fig. 37 se visualiza que el contenido volumétrico de agua (CVW) a 36 y 56 cm de profundidad tiene un comportamiento similar a lo descrito para la figura Fig. 35 para el suelo a 16 cm de profundidad, el suelo vegetado presenta menor CVW que el lado no vegetado y de forma particular los incrementos de CVW del lado vegetado son mayores que en el lado no vegetado y muchas veces llegan a superar el CVW final del lado no vegetado. Se visualiza de mejor manera que la pendiente de secado del CVW es mayor que el lado no vegetado. Por lo tanto el suelo vegetado presenta un comportamiento de mayor permeabilidad, mayor reducción del CVW en los mismos tramos de tiempo que el suelo no vegetación y valores menores del contenido volumétrico de agua en el suelo. Por otra parte, al aumentar la profundidad el efecto de las lluvias se suaviza, especialmente en la zona no vegetada.

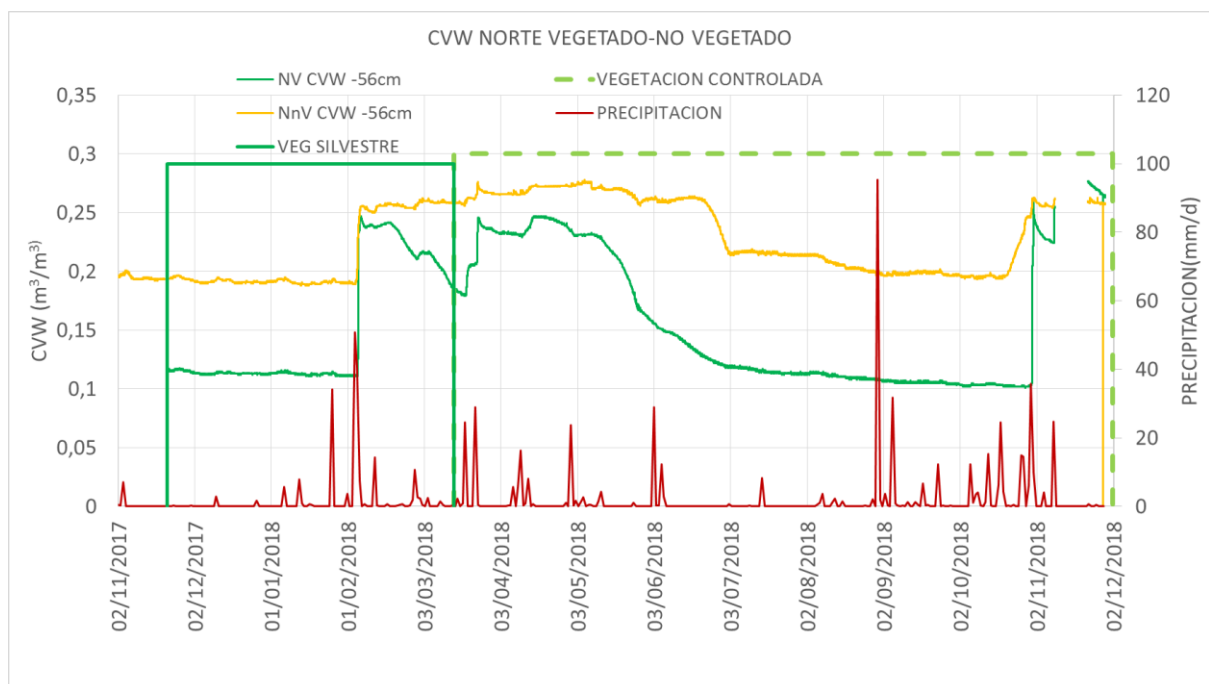


Fig. 37 Lado Norte CVW a 56cm de profundidad vegetado y no vegetado

3.2.1.2 Temperatura del subsuelo

Del lado norte, en la Fig. 38 se visualiza que la temperatura a 6 cm de profundidad del lado vegetado en los tres últimos meses del año 2018 es muy ligeramente mayor en

promedio que el lado no vegetado y en particular el lado no vegetado presenta valores menores que los mínimos del lado vegetado.

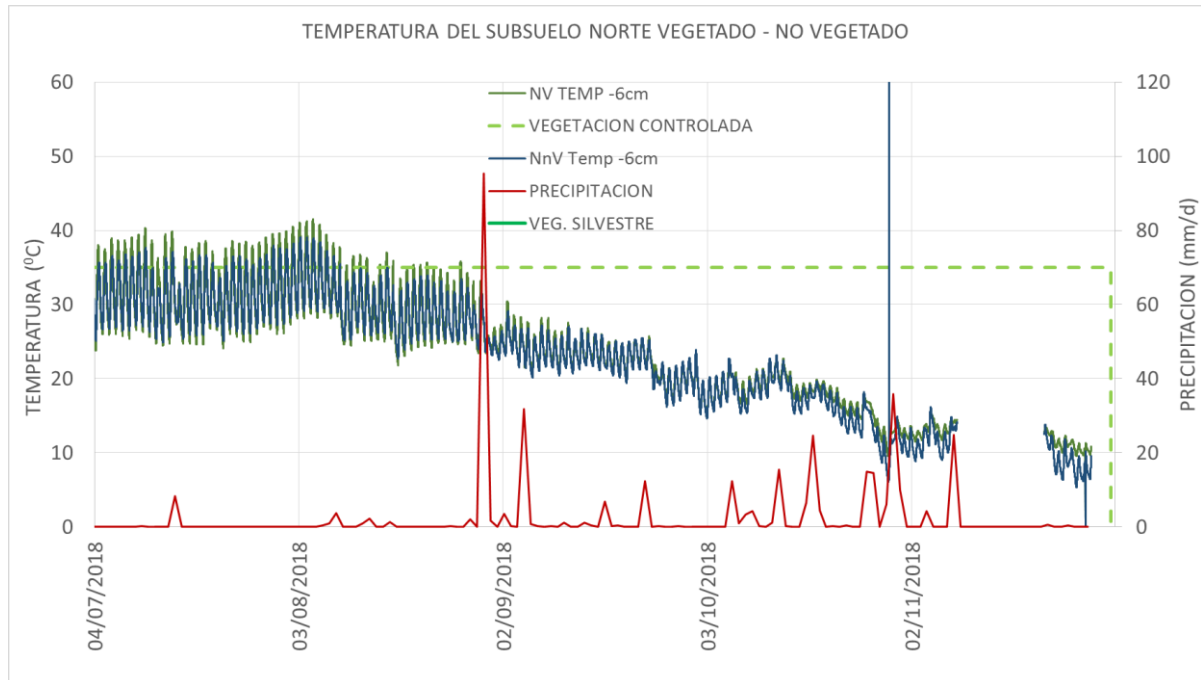


Fig. 38 Lado Norte Temperatura a 6cm de profundidad vegetado y no vegetado

Del lado norte, en la Fig. 39, Fig. 40 y Fig. 41 se visualiza que la temperatura a 16, 36 y 56 cm tienen un comportamiento similar en general. En la época de verano la temperatura del lado vegetado permanece ligeramente por debajo de lado no vegetado, como se visualiza en los meses de mayo, junio, julio y agosto del 2018. En invierno o temperaturas ambiente muy bajas el lado vegetado tiene temperaturas ligeramente mayores que el lado no vegetado, como se visualiza de mejor manera en los meses de octubre, noviembre del 2018 y octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero del 2017. Este efecto puede ser debido a que la vegetación actúa como una barrera frente al flujo de calor. Por otro lado queda claro que las variaciones diarias de la temperatura son mayores en la zona vegetada.

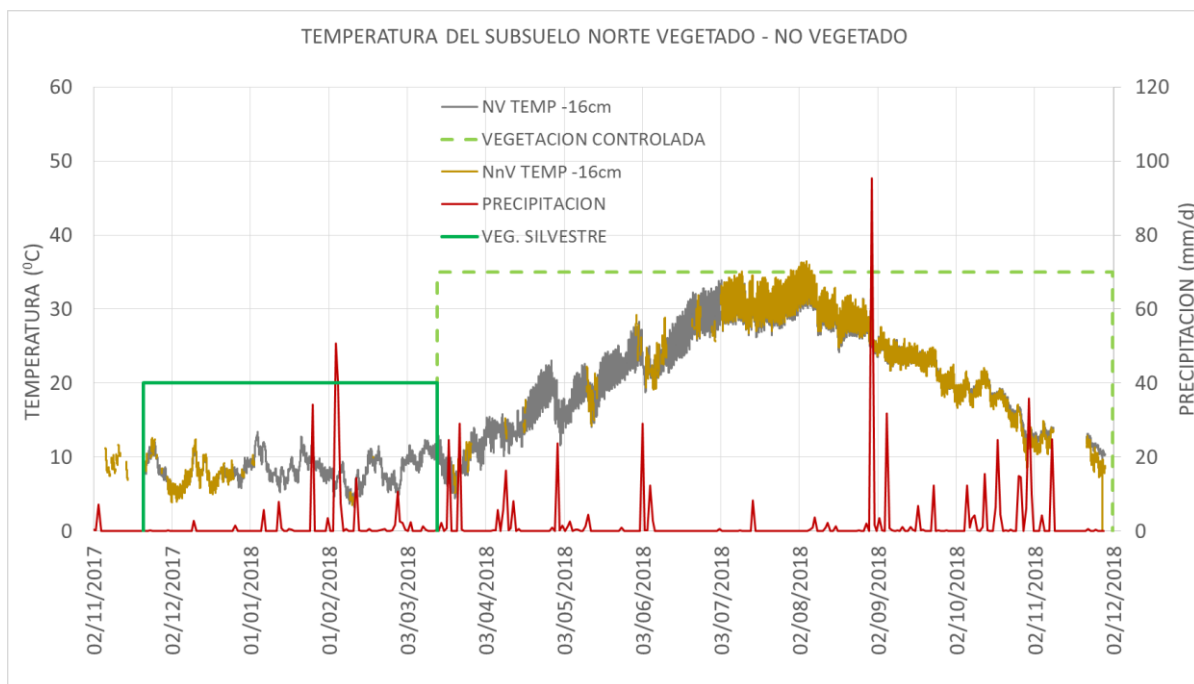


Fig. 39 Lado Norte Temperatura a 16cm de profundidad vegetado y no vegetado

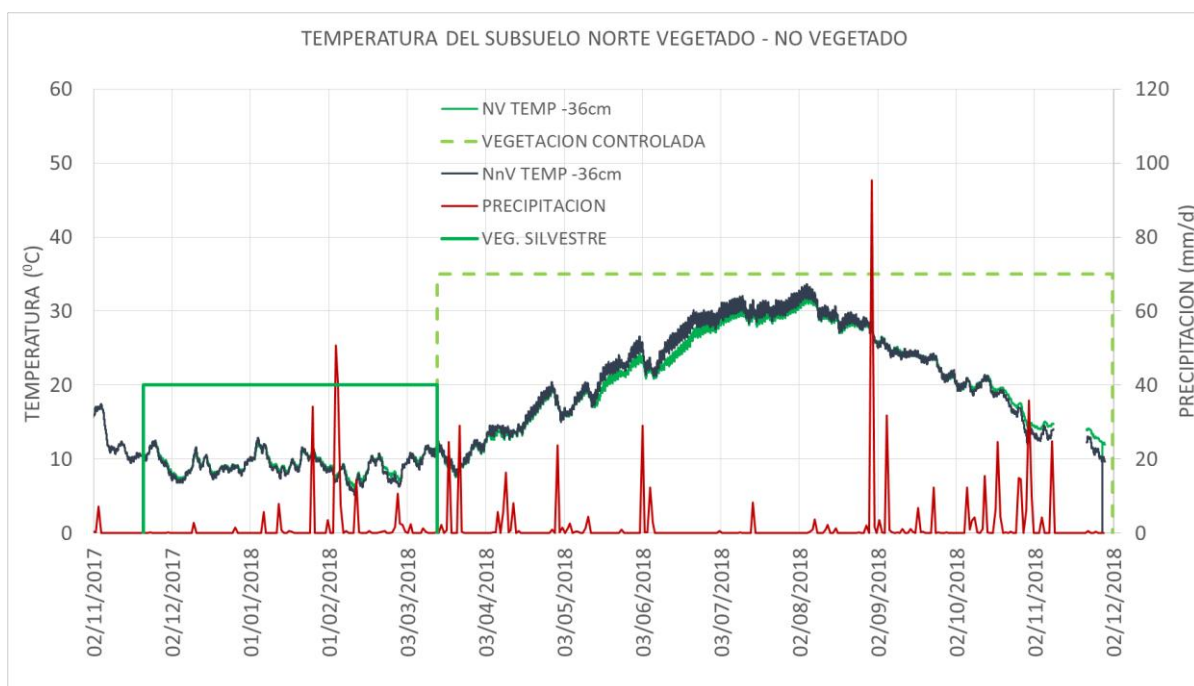


Fig. 40 Lado Norte Temperatura a 36cm de profundidad vegetado y no vegetado

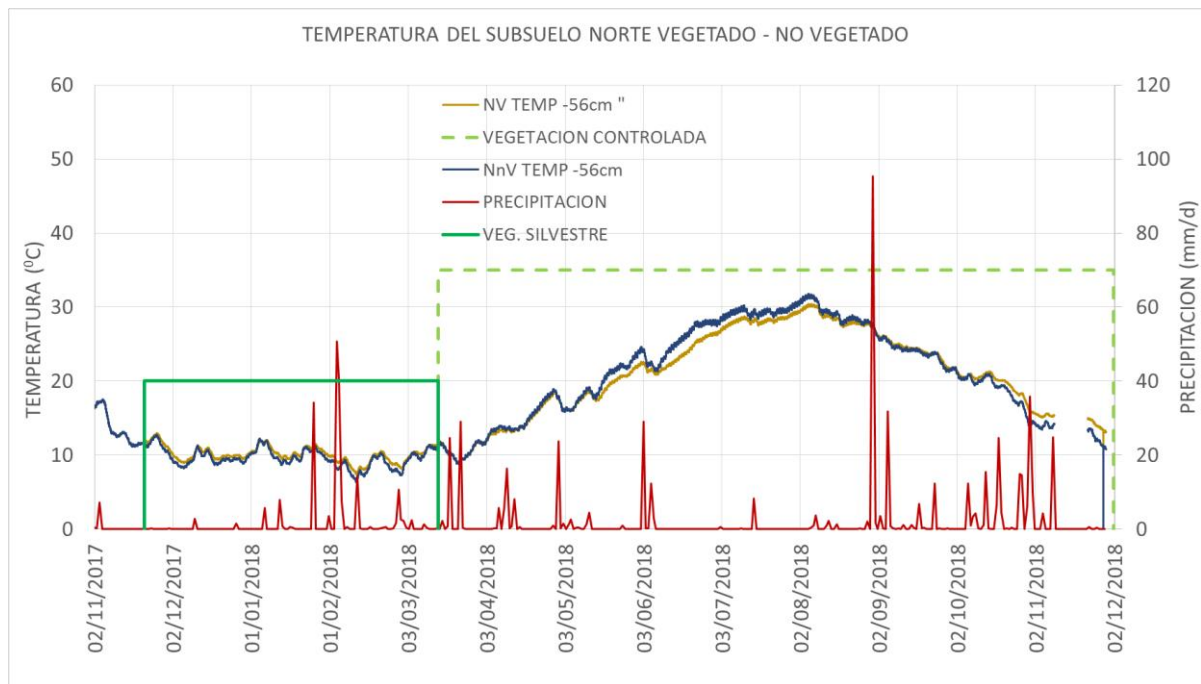


Fig. 41 Lado Norte Temperatura a 56cm de profundidad vegetado y no vegetado

3.2.1.3 Succión

En el lado norte a 16 cm de profundidad como se ve en la Fig. 42 y Fig. 43, la succión del suelo con vegetación silvestre es mayor y desde mediados de enero hasta mediados de marzo del 2018, existe un tramo de precipitaciones continuas donde la succión en el lado vegetado y no vegetado son mínimas con las diferencia de que la del lado vegetado silvestre es ligeramente mayor y en pequeños tramos de secado el lado vegetado silvestre logra recuperar un poco su succión.

A partir de mayo del 2018 las temperaturas son elevadas, aunque la vegetación sembrada apenas tiene 2 meses y medio, empiezan a distinguirse ciertas diferencias. Hasta principios de junio el suelo vegetado tiene mayor succión que el lado no vegetado y seguido de esto, una precipitación relevante baja la succión en ambos lados con la diferencia que el lado vegetado logra recuperar la succión con mayor rapidez que el lado no vegetado. En general este comportamiento es similar en temperaturas ambientes altas pero cuando la temperatura empieza a bajar y se presentan mayores precipitaciones como a partir de septiembre del 2018 el lado vegetado si tiene una mayor succión en secado pero su pendiente es menor que el lado no vegetado. En otoño

del 2018 a 16cm de profundidad la succión sube y baja más despacio en lado vegetado. En tramos de mojado su comportamiento es algo similar en ambos lados (Ver Fig. 43).

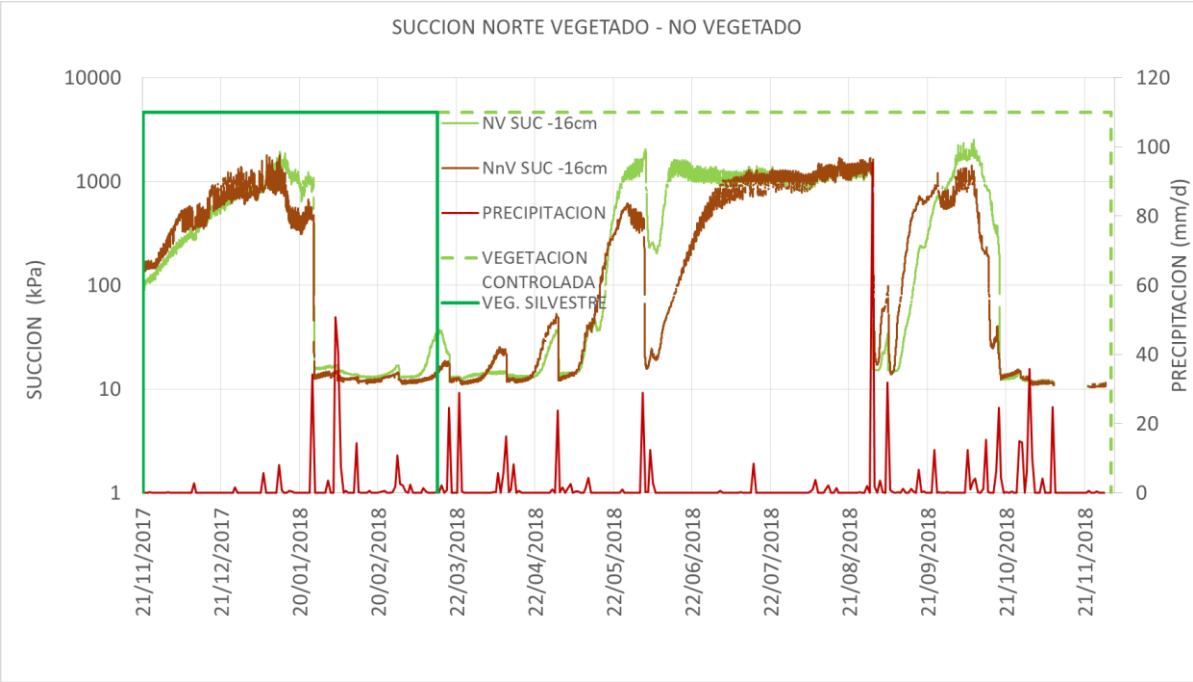


Fig. 42 Lado Norte Succión a 16cm de profundidad vegetado y no vegetado Año 2017-2018

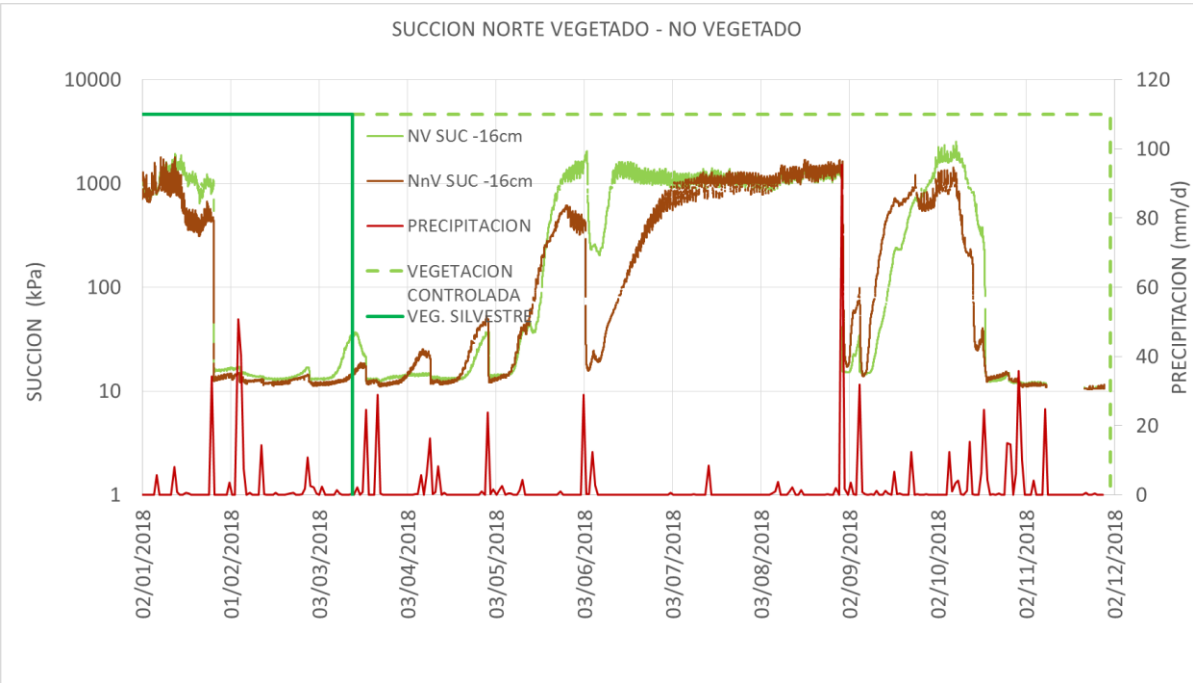


Fig. 43 Lado Norte Succión a 16cm de profundidad vegetado y no vegetado Año 2018

En el lado norte a 36 cm de profundidad como se ve en la Fig. 44 y Fig. 45, la succión del suelo con vegetación silvestre es mayor y desde mediados de enero hasta mediados de marzo del 2018, existe un tramo de precipitaciones continuas donde la succión en el lado vegetado y no vegetado son mínimas con la diferencia que el lado vegetado silvestre es ligeramente mayor y en un pequeño tramo de secado el lado vegetado silvestre logra recuperar ligeramente su succión.

A partir de mayo del 2018 las temperaturas son elevadas, aunque la vegetación sembrada apenas tiene 2 meses y medio, a 36 cm la diferencia es relevante y hasta principios de junio el suelo vegetado tiene mayor succión por encima de los 1000 kPa y el lado no vegetado tiene una succión de 100 kPa en el mismo tramo de tiempo. Seguido de esto, una precipitación relevante baja la succión en ambos lados, pero no en la misma proporción, por lo que el lado vegetado baja su succión a 1000 kPa y rápidamente recupera, mientras que lado no vegetado a finales de agosto logra recuperar su succión a 1000 kPa, pero sigue siendo ligeramente más baja que el lado vegetado. Por lo tanto la diferencia, es que el lado vegetado logra recuperar la succión con mayor rapidez que el lado no vegetado (Ver Fig. 45).

En general este comportamiento es similar en temperaturas ambientes altas pero cuando la temperatura empieza a bajar y se presentan mayores precipitaciones como a partir de septiembre del 2018 el lado vegetado si tiene una mayor succión en secado pero en tramos de mojado, a diferencia del comportamiento a 16 cm, su pendiente es mayor que el lado no vegetado (Ver Fig. 45).

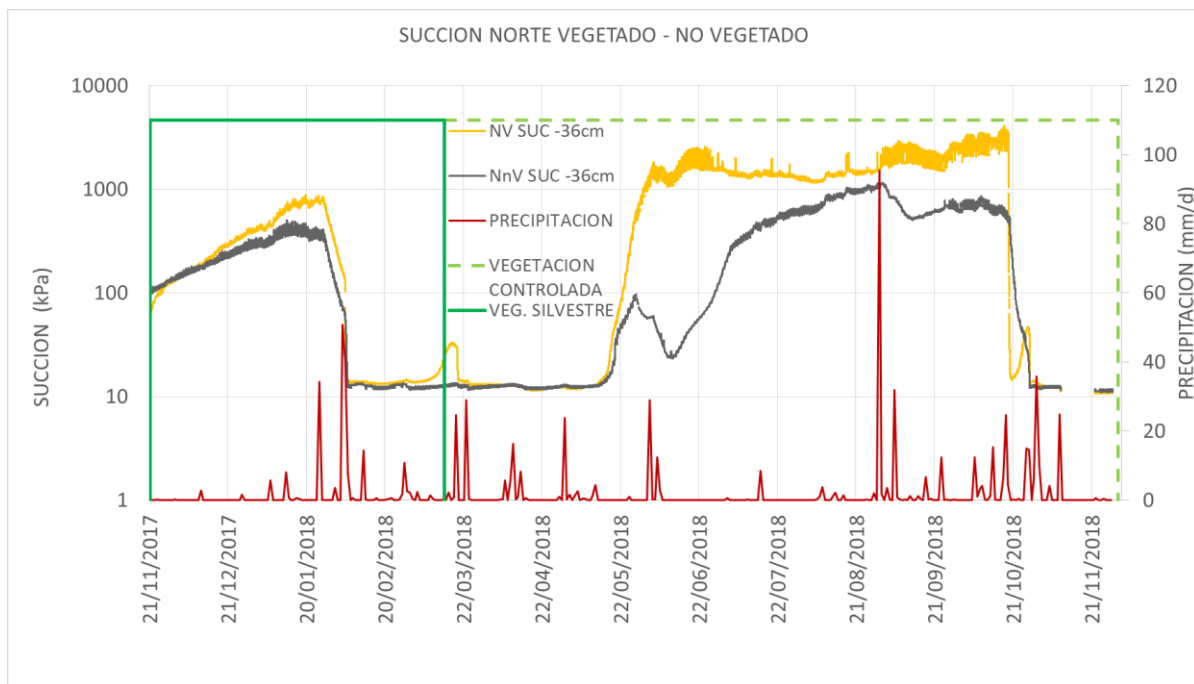


Fig. 44 Lado Norte Succión a 36cm de profundidad vegetado y no vegetado Año 2017-2018

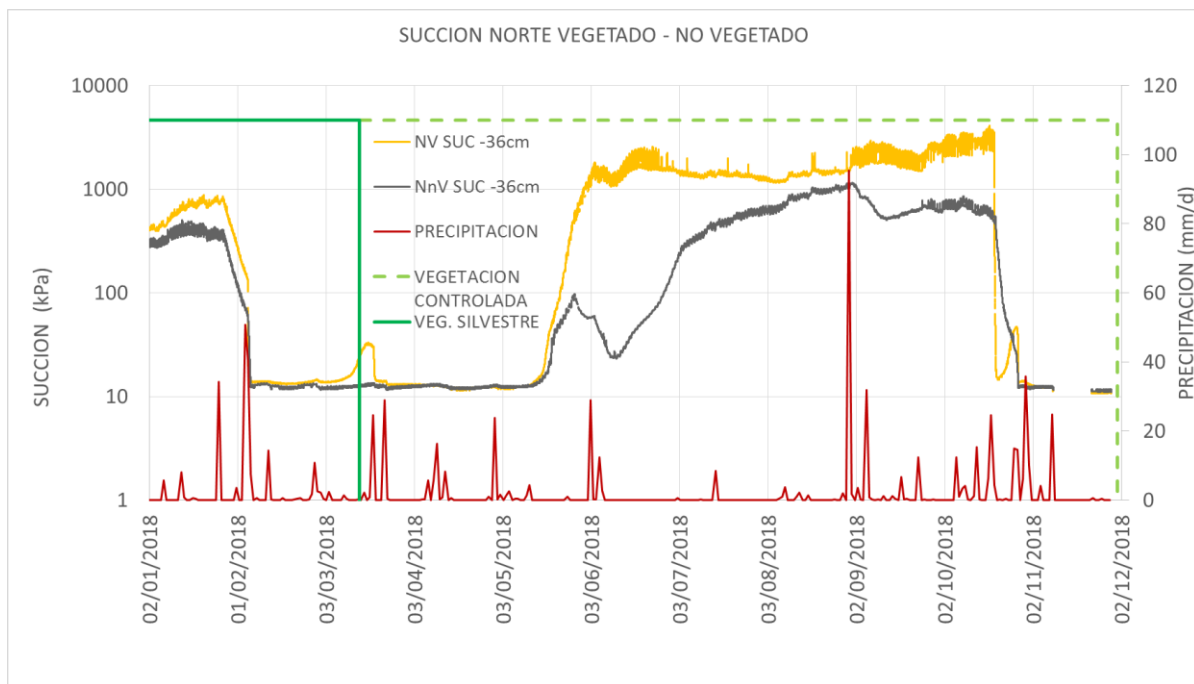


Fig. 45 Lado Norte Succión a 36cm de profundidad vegetado y no vegetado Año 2018

En resumen, la vegetación aumenta la succión y reduce el contenido volumétrico de agua. En episodios de humedecimiento y secado hay un cierto retraso en los cambios de

succión de las zonas vegetadas respecto a los cambios observados en las zonas no vegetadas.

3.2.2 Sur Vegetado-No Vegetado

3.2.2.1 Contenido Volumétrico de Agua

Tomando en cuenta el lado sur, en la Fig. 46 se visualiza que el contenido volumétrico de agua (CVW) a 6 cm de profundidad del lado vegetado es menor que el lado no vegetado y de forma particular del lado vegetado tiene incrementos de CVW mayores que en el lado no vegetado y muchas veces llegan a superar el CVW final del lado no vegetado. En ciertos tramos de secado el CVW baja con mayor pendiente que el lado no vegetado y llegar hasta por debajo de los mínimos del lado no vegetado. Por lo tanto el suelo vegetado presenta un comportamiento de mayor permeabilidad y de mayor reducción de CVW en los mismos tramos de tiempo que el suelo no vegetación.

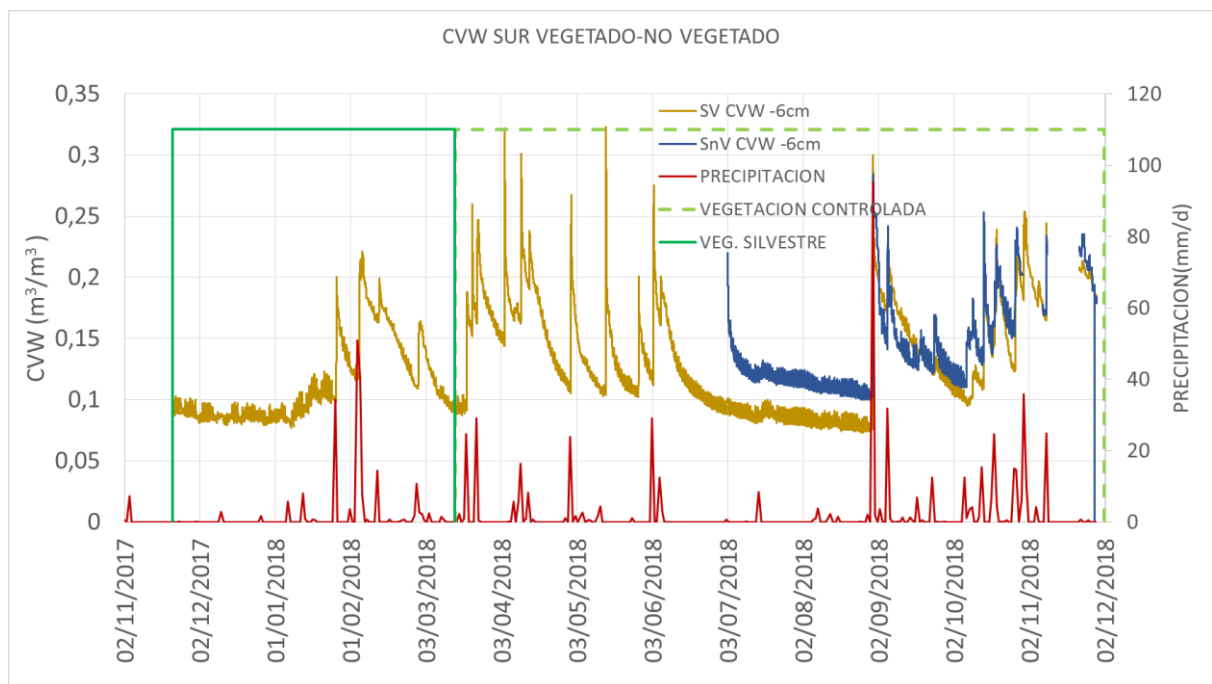


Fig. 46 Lado Sur CVW a 6cm de profundidad vegetado y no vegetado

Tomando en cuenta el lado sur, en la Fig. 47 se visualiza que el contenido volumétrico de agua (CVW) a 16 cm de profundidad del lado vegetado es menor que el lado no

vegetado y de forma particular del lado vegetado tiene incrementos de CVW mayores que en el lado no vegetado y la mayoría de veces llegan a superar el CVW final del lado no vegetado. En tramos de secado el CVW baja con mayor pendiente que el lado no vegetado y llega muy por debajo de los mínimos del lado no vegetado. Por lo tanto el suelo vegetado presenta un comportamiento de mayor permeabilidad y de mayor reducción de CVW en los mismos tramos de tiempo que el suelo no vegetación.

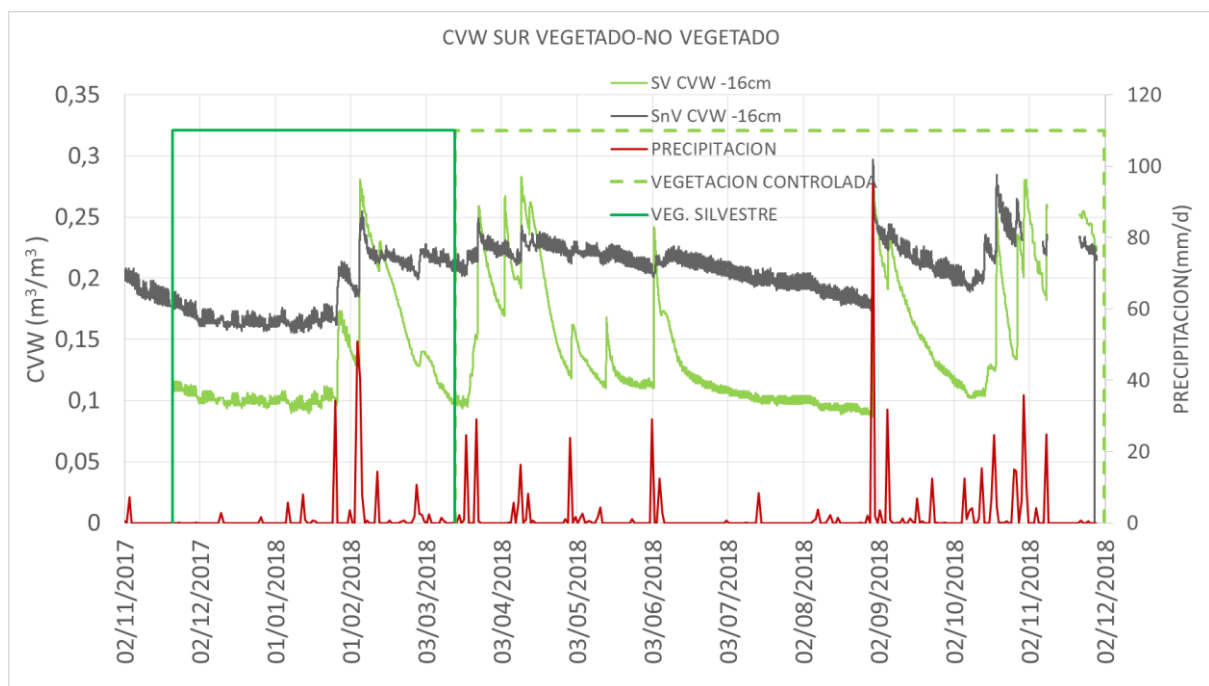


Fig. 47 Lado Sur CVW a 16cm de profundidad vegetado y no vegetado

Tomando en cuenta el lado sur, en la Fig. 48 y Fig. 49 se visualiza que el contenido volumétrico de agua (CVW) a 36 y 43-57 cm de profundidad es similar a lo descrito en la Fig. 47 a 16 cm de profundidad con la diferencia que los cambios de comportamientos en el lado vegetado no son tan sensibles y presentan pendientes menos bruscas. En general el lado vegetado presenta mayor permeabilidad, mayor pendiente de secado y contenidos volumétricos de agua menores que el lado no vegetado.

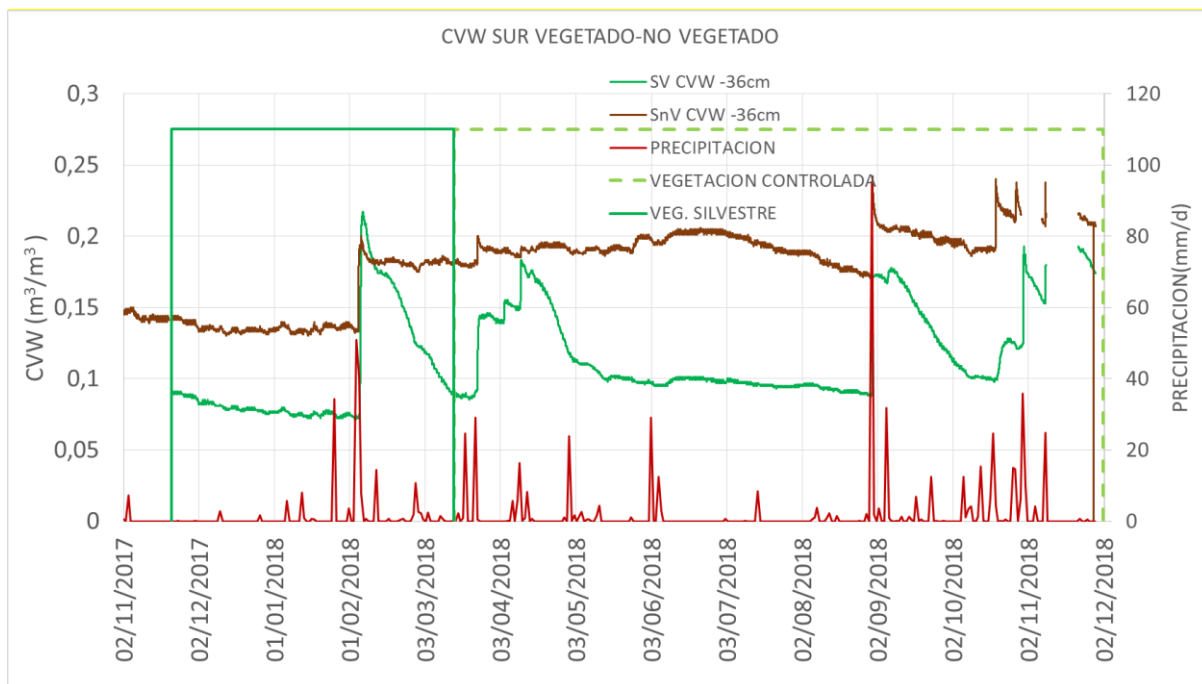


Fig. 48 Lado Sur CVW a 36 cm de profundidad vegetado y no vegetado

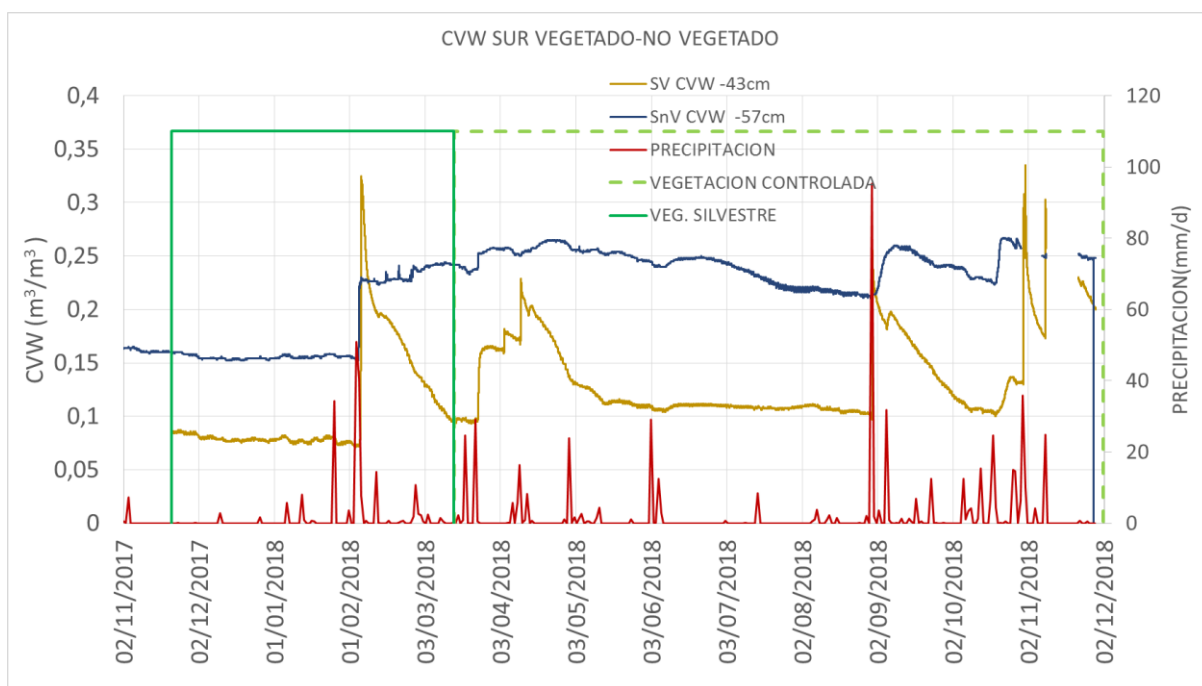


Fig. 49 Lado Sur CVW a 43 y 56 cm de profundidad vegetado y no vegetado

En resumen, las conclusiones de la comparación entre la zona vegetada y no vegetada son análogas en el lado norte y en el lado sur.

3.2.2.2 Temperatura del subsuelo

En lado Sur en la Fig. 50 y Fig. 51, que pertenece a temperaturas de 6 y 16 cm respectivamente, no se observa diferencias relevantes entre el lado vegetado y no vegetado.

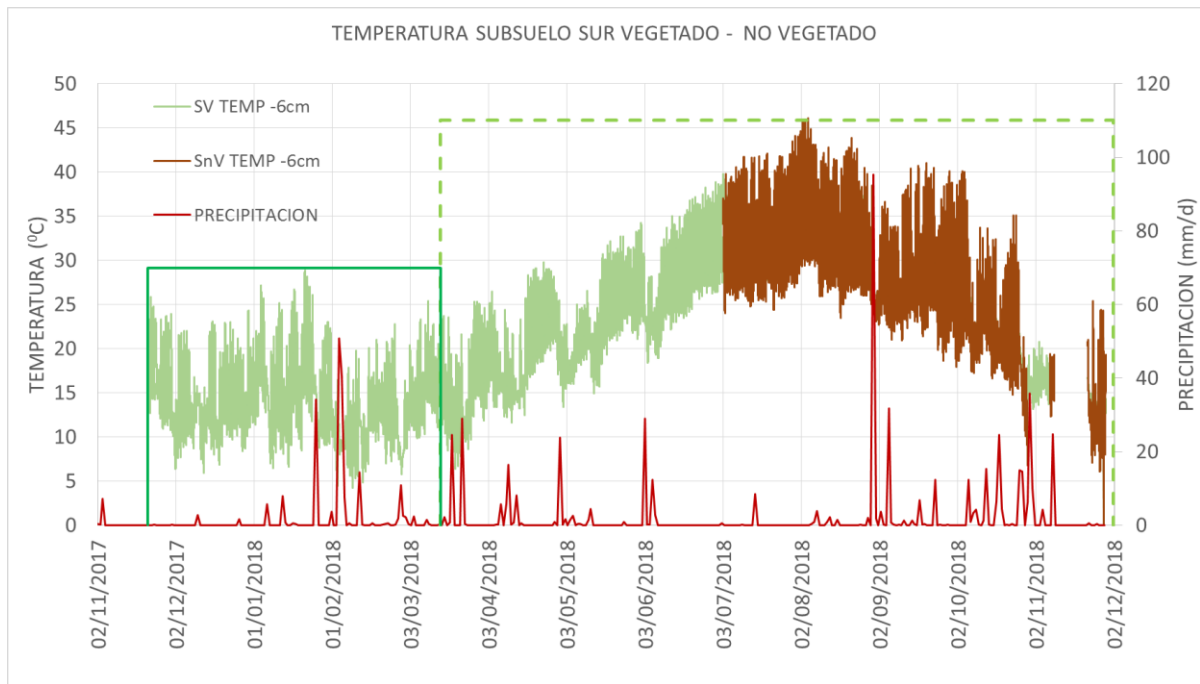


Fig. 50 Lado Sur Temperatura a 6cm de profundidad vegetado y no vegetado

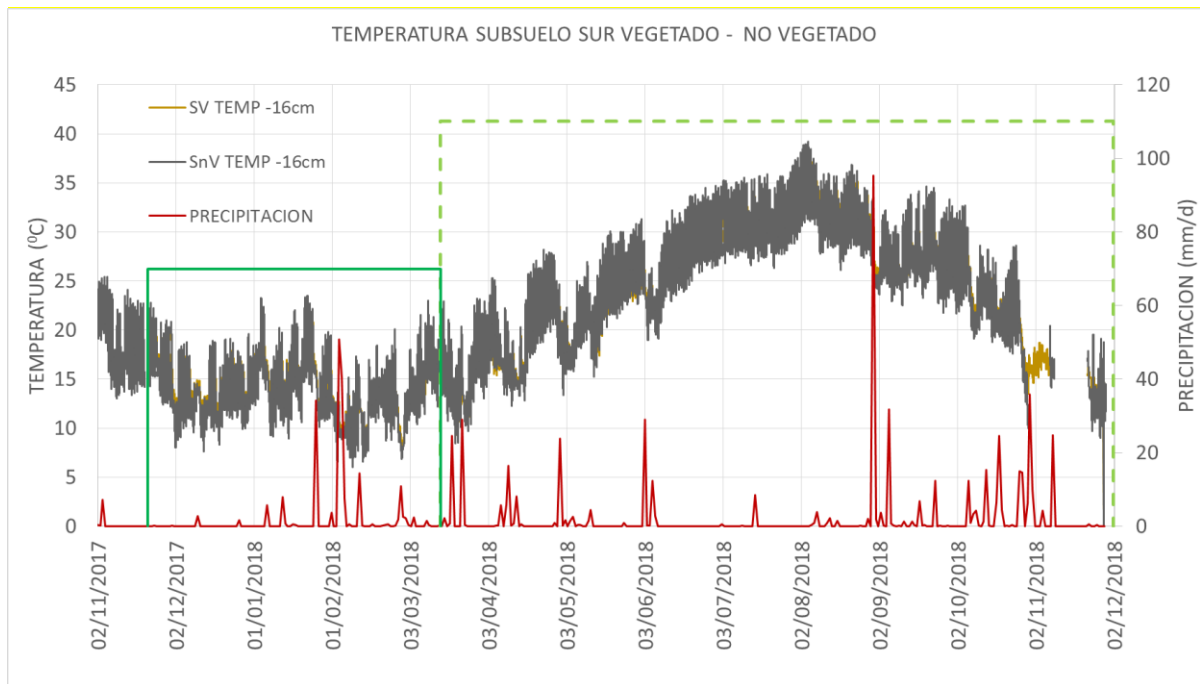


Fig. 51 Lado Sur Temperatura a 16cm de profundidad vegetado y no vegetado

Del lado sur en la Fig. 52 y Fig. 53 pertenecientes a las temperaturas de las profundidades 36 y 43-57 cm respectivamente, sus comportamientos en el suelo con vegetación silvestre son similares a lo descrito en la Fig. 39, Fig. 40 y Fig. 41 del lado norte. Se visualiza que la temperatura a 36 y 43-57 cm tienen un comportamiento cuando la temperatura es creciente el suelo con vegetación silvestre permanece ligeramente por debajo de lado no vegetado y a temperaturas ambiente muy bajas el lado vegetado tiene temperaturas ligeramente mayores que el lado no vegetado. Estos comportamientos no se pueden distinguir en la época de la vegetación sembrada debido a que del lado Sur la vegetación es escasa y no creció de la misma forma que del lado norte.



Fig. 52 Lado Sur Temperatura a 36 cm de profundidad vegetado y no vegetado

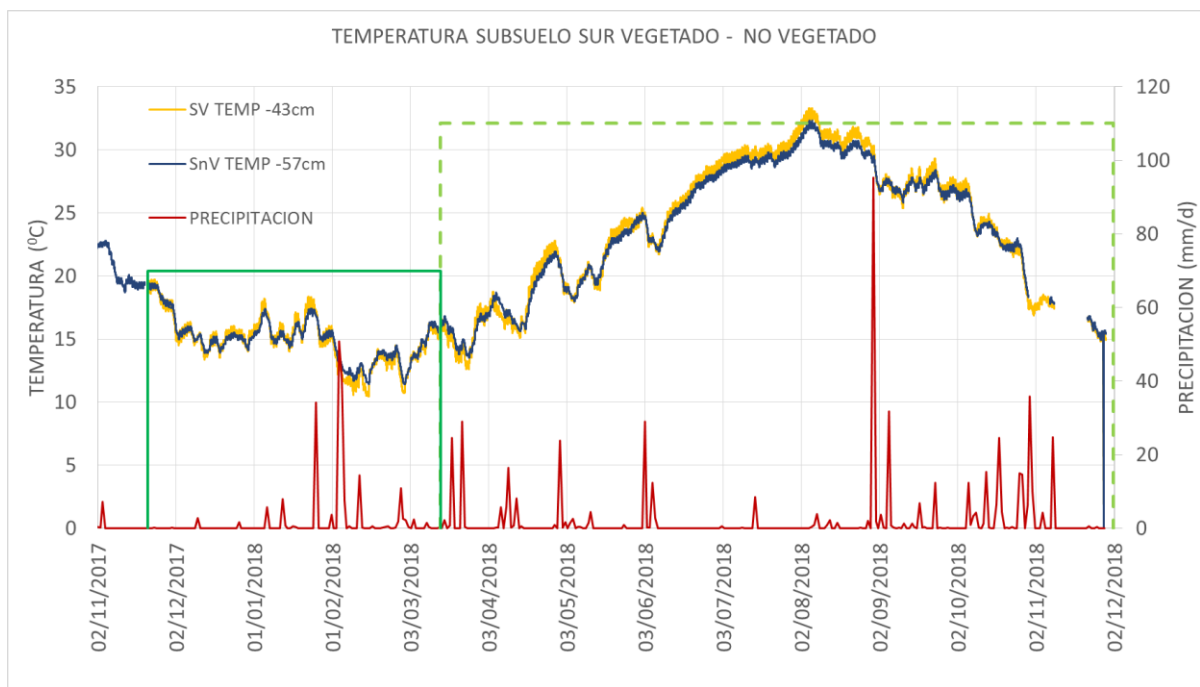


Fig. 53 Lado Sur Temperatura a 43 cm y 57 cm de profundidad vegetado y no vegetado

3.2.2.3 Succión

En la Fig. 54 se observa que en el lado sur en general el suelo con vegetación silvestre presenta una succión en secado mayor que el lado no vegetado, con diferencias hasta en ciertos tramos de 9000 y 99000 kPa, mientras que en tramos con lluvias abundantes las succiones son similares. A partir de mayo del 2018 las temperaturas son elevadas, aunque la vegetación sembrada apenas tiene 2 meses y medio, a 16 cm la diferencia es relevante y hasta principios de julio el suelo vegetado tiene mayor succión por encima de los 1000 kPa y el lado no vegetado tiene una succión de 130 kPa promedio en el mismo tramo de tiempo. Seguido de esto la precipitación baja la succión en ambos lados, pero el lado no vegetado tiene una pendiente menor de recuperación hasta agosto, mientras que el suelo vegetado recupera rápidamente su succión, similar a lo que pasa en lado norte, pero no en la misma proporción. La diferencia, es que el lado vegetado logra recuperar la succión con mayor rapidez en temperaturas altas que el lado no vegetado, pero en época de invierno o temperaturas bajas con precipitaciones seguidas su succión se recupera con menor pendiente, aunque si llega a tener mayor succión final, y en tramos de mojado cae con mayor magnitud casi igualando al lado no vegetado.

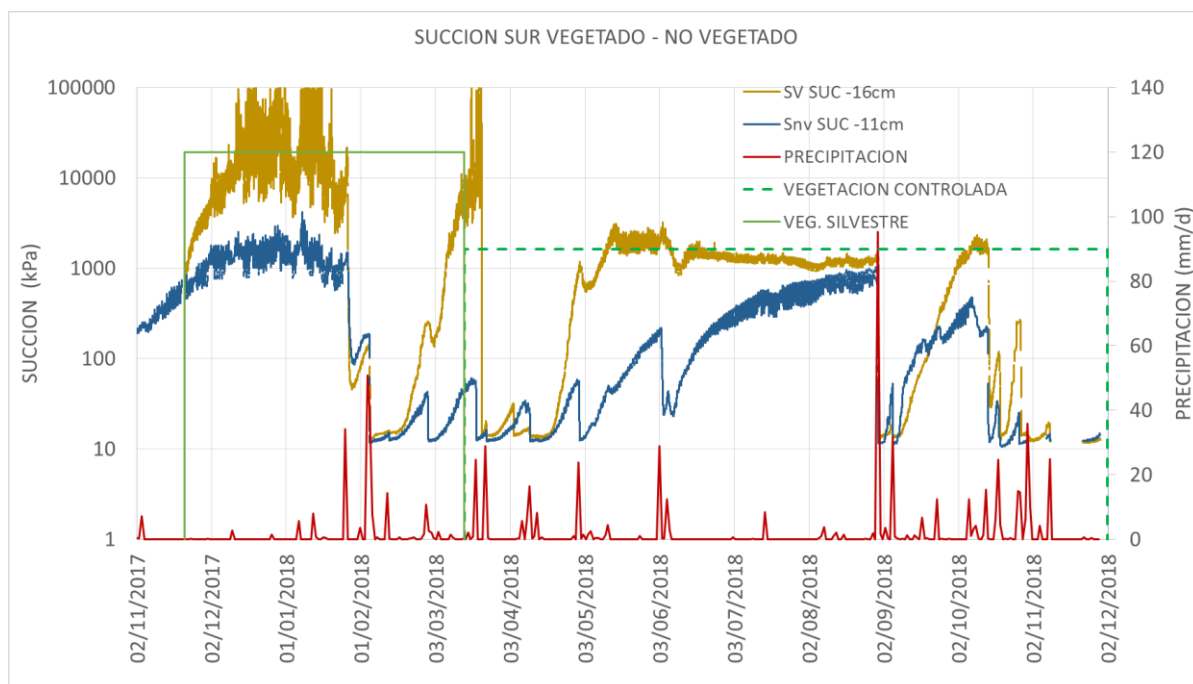


Fig. 54 Lado Sur Succión a 16 y 11 cm de profundidad (Sur vegetado y no vegetado)

En la Fig. 55 el comportamiento de la succión a 36 y 32 cm de profundidad es muy similar a lo que se observa en la Fig. 54 a 16 y 11 cm de profundidad, con la diferencia que el cambio de succión del suelo no vegetado a 32cm no son tan sensibles como el de menor profundidad. En general se visualiza en el lado vegetado una mayor y más rápida succión en temperaturas altas y una caída de mayor magnitud en la succión con temperaturas bajas y precipitaciones continuas.

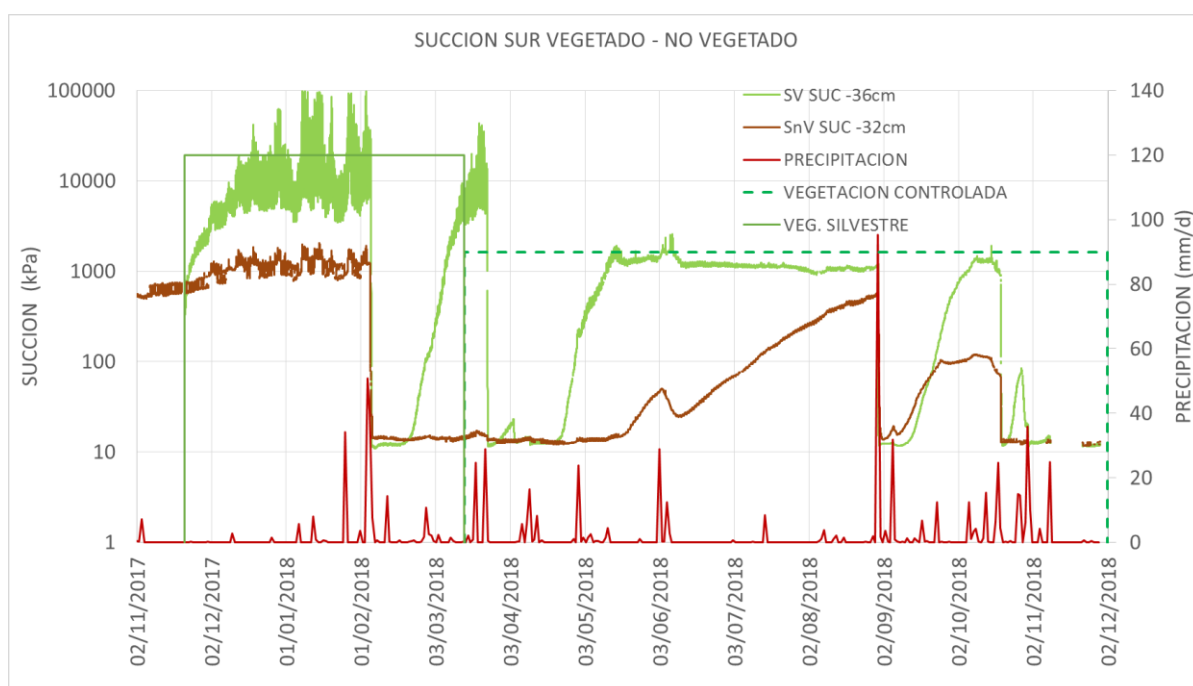


Fig. 55 Succión a 36 y 32 cm de profundidad (Sur vegetado y no vegetado).

3.3 Curva de retención

La curva de retención representa la relación existente entre la succión y la cantidad de agua que tiene el suelo. Sirve para caracterizar, entender y predecir el comportamiento de la relación flujo de agua (contenido de humedad) en suelos no saturados. Por otra parte la succión está relacionada con la cohesión aparente, se dice resistencia aparente, debido a que una vez saturado el material se anula. La interacción del fluido con el suelo se rige por la capilaridad del material y capacidad de absorción que a su vez depende con mayor importancia de la composición química del suelo, temperatura y su fluido (ROMERO et al, 2011).

De los resultados descritos en el apartado 2, se derivan las siguientes gráficas que relacionan el contenido volumétrico de agua con la succión. A continuación se observa su comportamiento y se estiman parámetros para cada caso, según la metodología de Van Genurchen (1980) (Lado norte y lado sur, vegetado y no vegetado).

3.3.1 Lado Norte

3.3.1.1 Norte No Vegetado

Se puede observar en la Fig. 56, que el sensor detecta como mínimo una succión de 10 kPa, pero se presume que al seguir aumentando el contenido volumétrico de agua (CVW), para una succión de cero el máximo CVW es de 0.28 y que su succión máxima es de 1790 y 1150 para 16 y 36 cm de profundidad respectivamente.

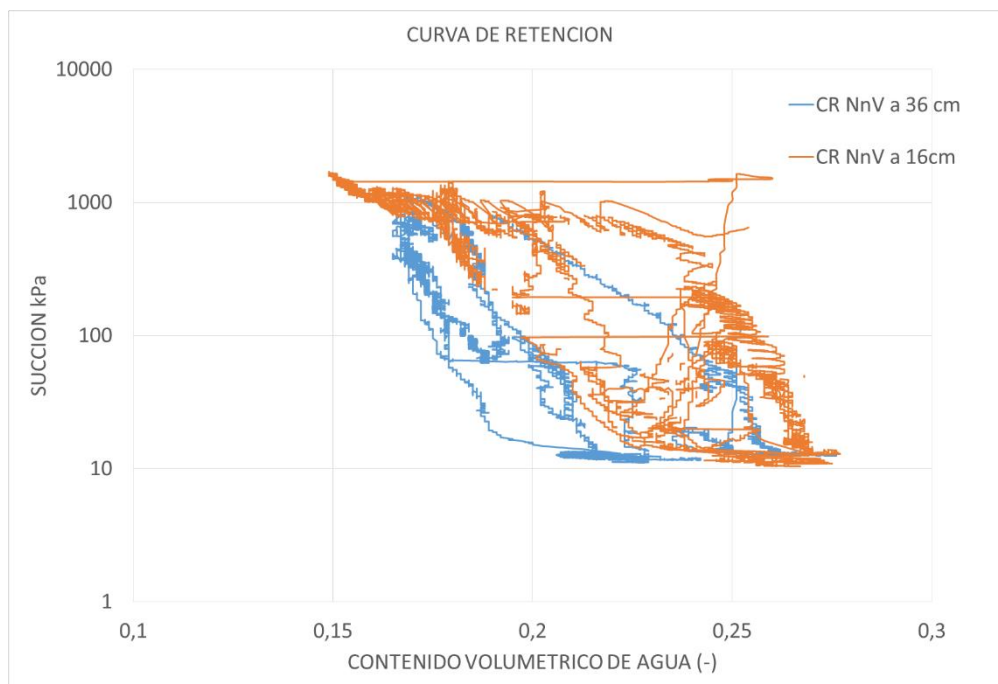


Fig. 56 Curva de retención Talud Norte no Vegetado de 16 y 36 cm de profundidad Año 2017-2018

En la Fig. 57 se muestra un periodo de secado a 16 y 36 cm de profundidad, donde la succión asciende de 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores) a 900 kPa promedio y en la curva de 16 cm de profundidad una entrada de aire a 900 kPa promedio.

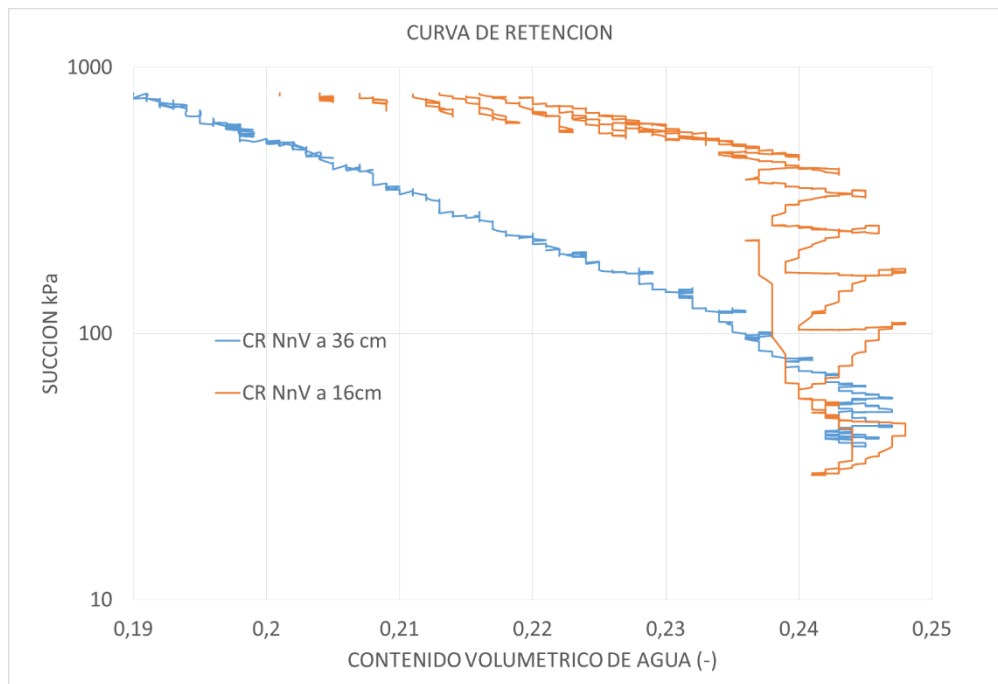


Fig. 57 Curva de retención del Talud Norte no Vegetado de 16 y 36 cm de profundidad (secado)

En las Fig. 58 y Fig. 59 se muestran periodos de mojado a 16 y 36 cm de profundidad, donde la succión desciende a 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores). En la curva de 16 cm de profundidad se visualiza mejor su comportamiento que a 36cm. Si comparamos con los comportamientos de secado se puede diferenciar que en mojado la pendiente de caída es mayor que la pendiente de secado.

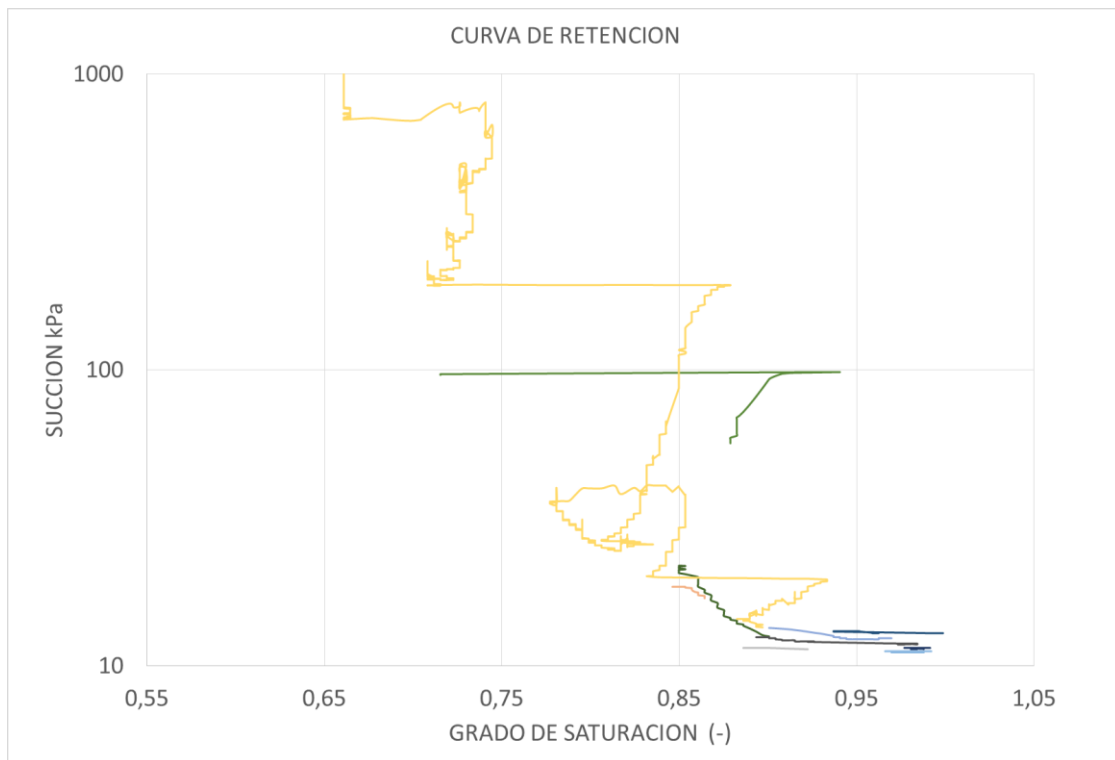


Fig. 58 Curva de retención del Talud Norte no Vegetado de 16 cm de profundidad (mojado)

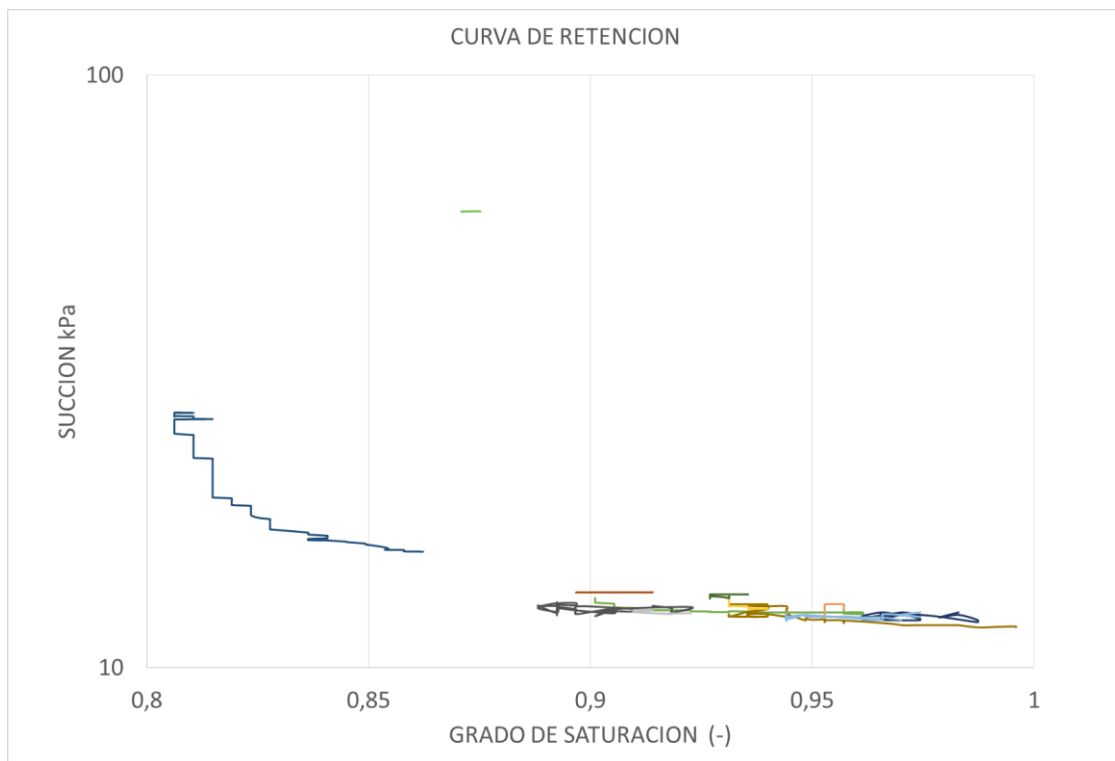


Fig. 59 Curva de retención del Talud Norte no Vegetado de 36 cm de profundidad (mojado)

3.3.1.2 Norte Vegetado

Se puede observar en la Fig. 60, para una succión de cero el máximo CVW promedio es de 0.28 y que su succión máxima es de 2530, 4081 y 3295 kPa para 16, 36 y 56 cm de profundidad respectivamente.

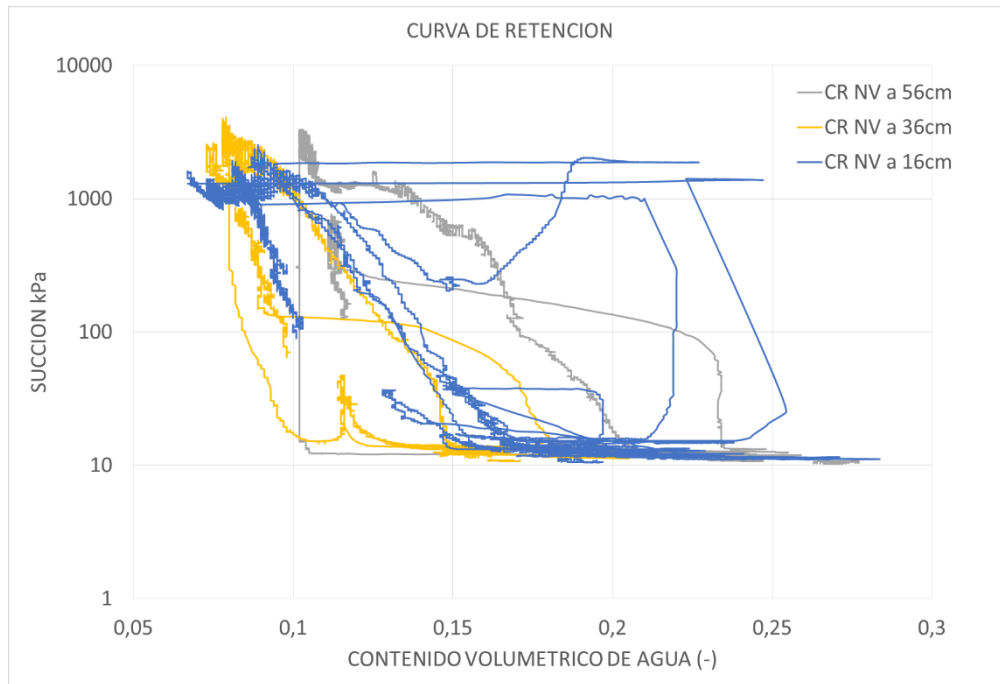
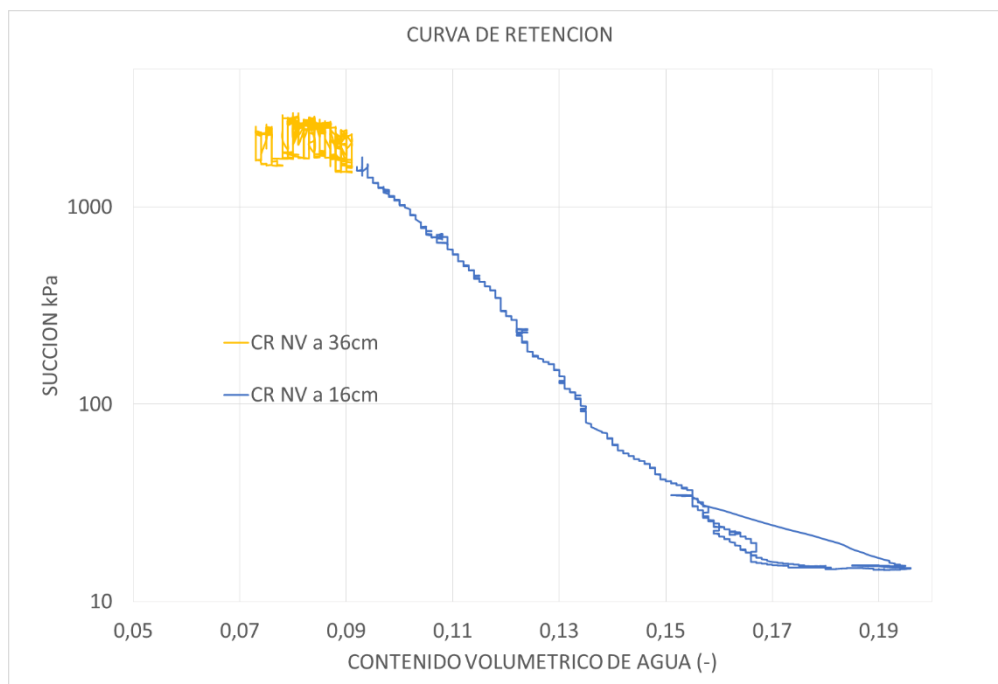
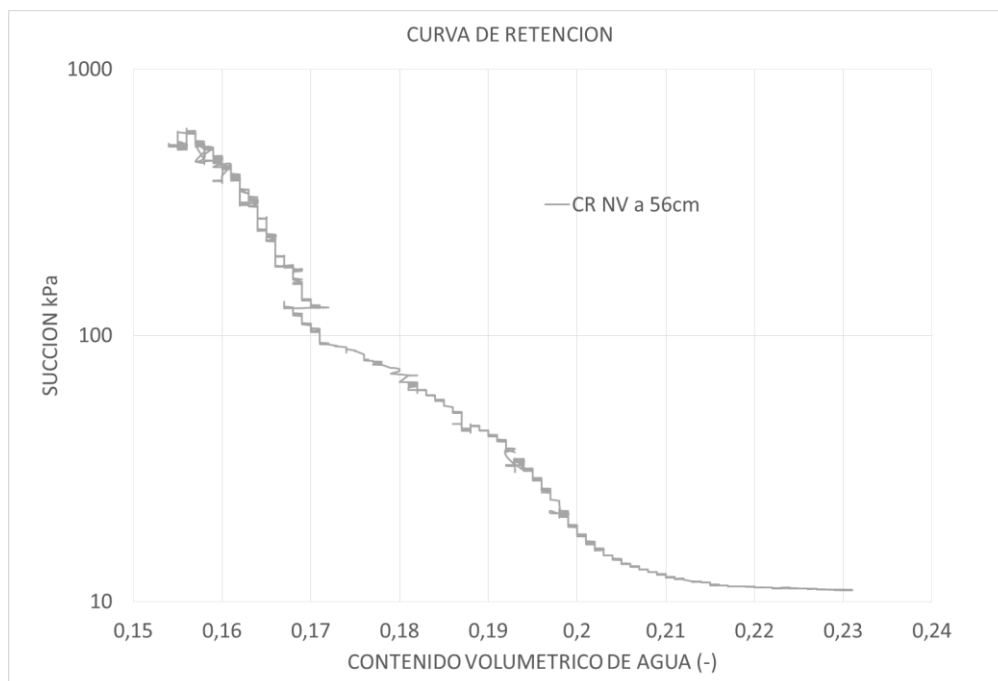


Fig. 60 Curva de retención Talud Norte Vegetado de 16, 36 y 56 cm de profundidad Año 2017-2018

En la Fig. 71, se muestra un periodo de secado a 16 y 36 cm de profundidad, donde la succión asciende de 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores) 1500 kPa promedio y en la curva de 36 cm de profundidad una entrada de aire a 2000 kPa promedio.



En la Fig. 75, se muestra un periodo de secado a 56 cm de profundidad, donde la succión asciende de 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores) a 800 kPa promedio.



Similar a lo que se observa en el lado norte no vegetado, en las Fig. 63 y Fig. 64 se muestran periodos de mojado a 16 y 36 cm de profundidad, donde la succión desciende a 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores), También en la curva de 16 cm de profundidad se visualiza mejor su comportamiento que a 36cm, esto porque los periodos de mojado son cortos y la succión baja rápidamente, sin poder visualizar valores por debajo de 10 kPa.

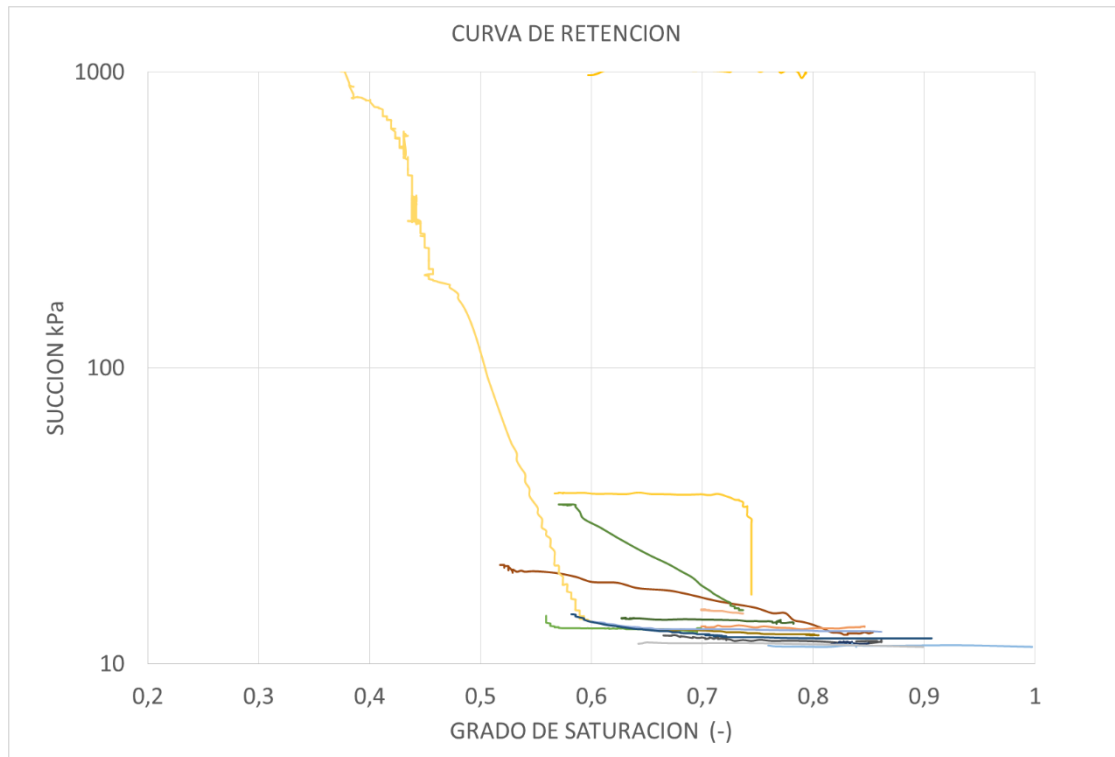


Fig. 63 Curva de retención Talud Norte Vegetado a 16 cm de profundidad (mojado)

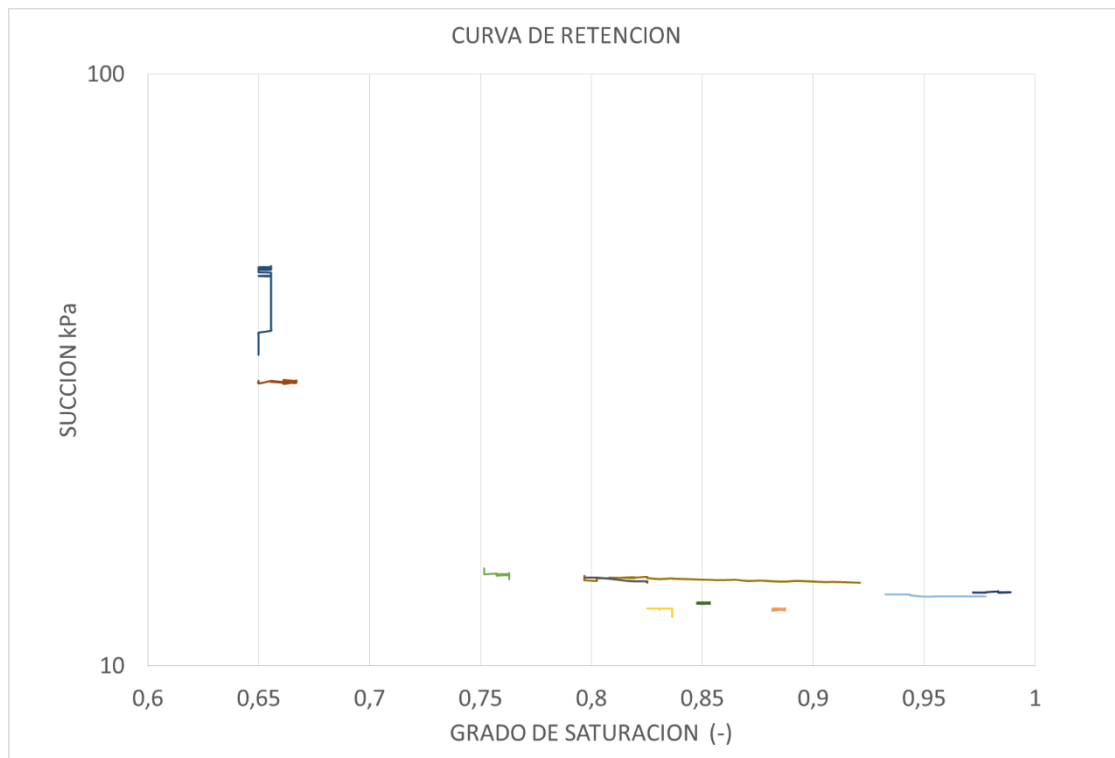


Fig. 64 Curva de retención Talud Norte Vegetado a 36 cm de profundidad (mojado)

3.3.1.3 Análisis comparativo Vegetado-No vegetado

A 16 cm de profundidad lado norte como se ve en la Fig. 65 en azul se puede visualizar que el suelo con vegetación es capaz de contener el mismo o mayor contenido volumétrico de agua (CVW) en un rango de 0.28, ganar una mayor succión con diferencia de 2530 a 1791 kPa y reducir su contenido volumétrico de agua sustancialmente. La reducción del CVW en la parte vegetada puede ser debida a la reducción de la porosidad debido al volumen que ocupan las raíces y de la capacidad de absorción de las plantas.

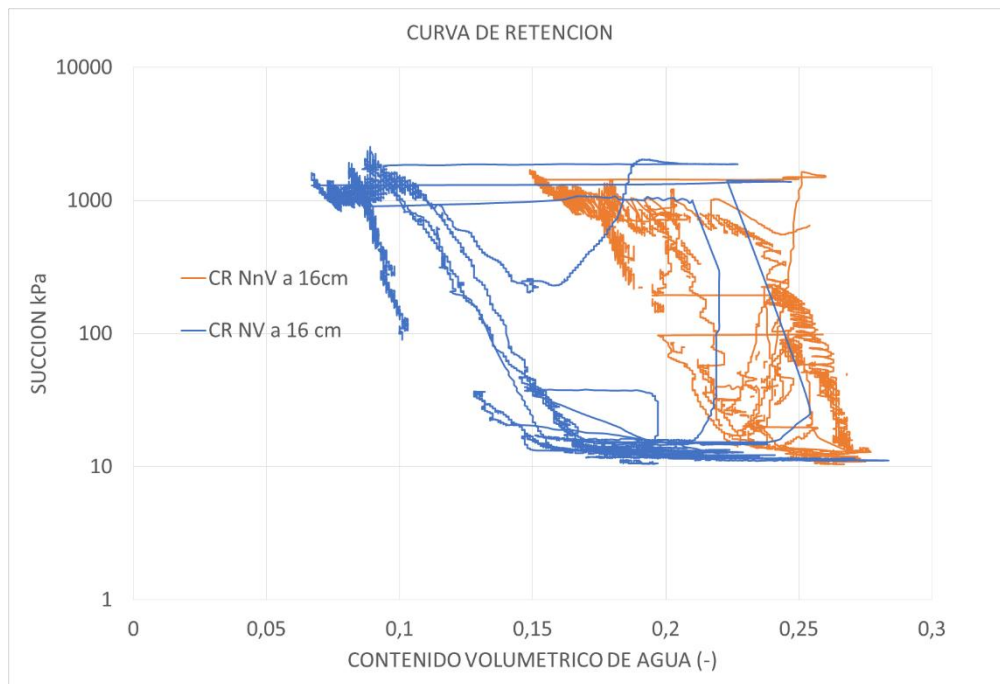


Fig. 65 Curva de retención Talud Norte Vegetado- no Vegetado de 16 cm de profundidad Año 2017-2018

A 36 cm de profundidad lado norte como se ve en la Fig. 66 en amarillo se puede visualizar que el suelo con vegetación tiene un mismo comportamiento a lo anteriormente descrito con una gran capacidad de CVW, pero no igual al no vegetado por 0,04, una mayor succión con diferencia de 4081 a 1151 kPa y reducción de su contenido volumétrico de agua sustancialmente.

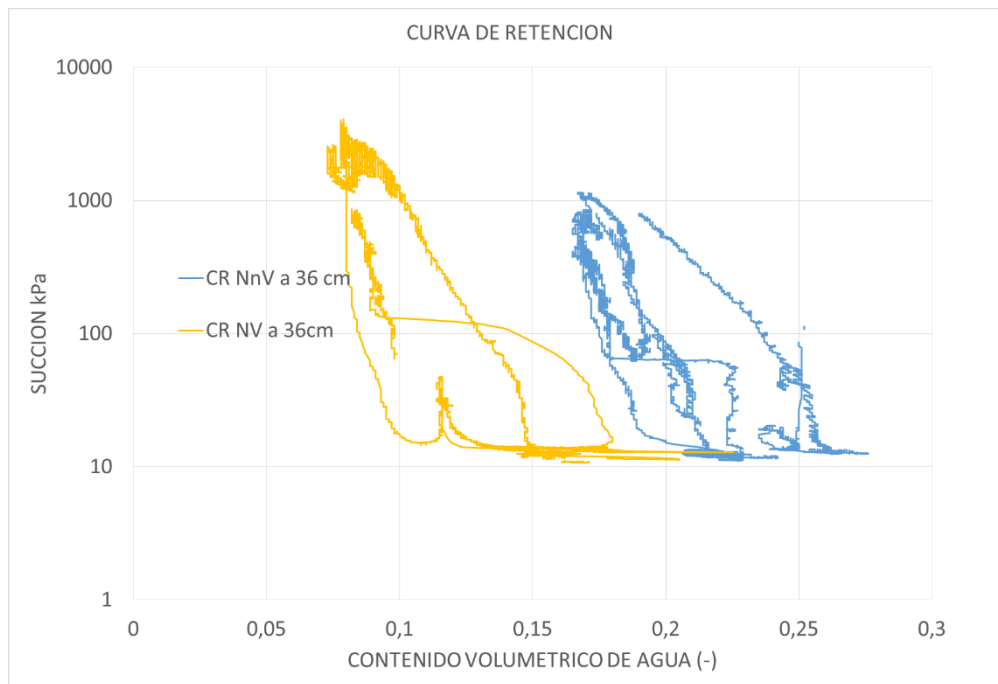


Fig. 66 Curva de retención Talud Norte Vegetado- no Vegetado de 36 cm de profundidad Año 2017-2018

3.3.2 Lado Sur

3.3.2.1 Sur No Vegetado

Igual que lo descrito en la Fig. 56, apartado 3.2.1.1, en la Fig. 67 Curva de retención del Talud Sur no Vegetado de 16 y 32 cm de profundidad Año 2017-2018 se observa para una succión de cero el máximo (CVW) es de 0.30 y 0.24 a 16 y 36 cm de profundidad respectivamente, su succión máxima es de 4196 (-16 cm) y 2048 (-36 cm).

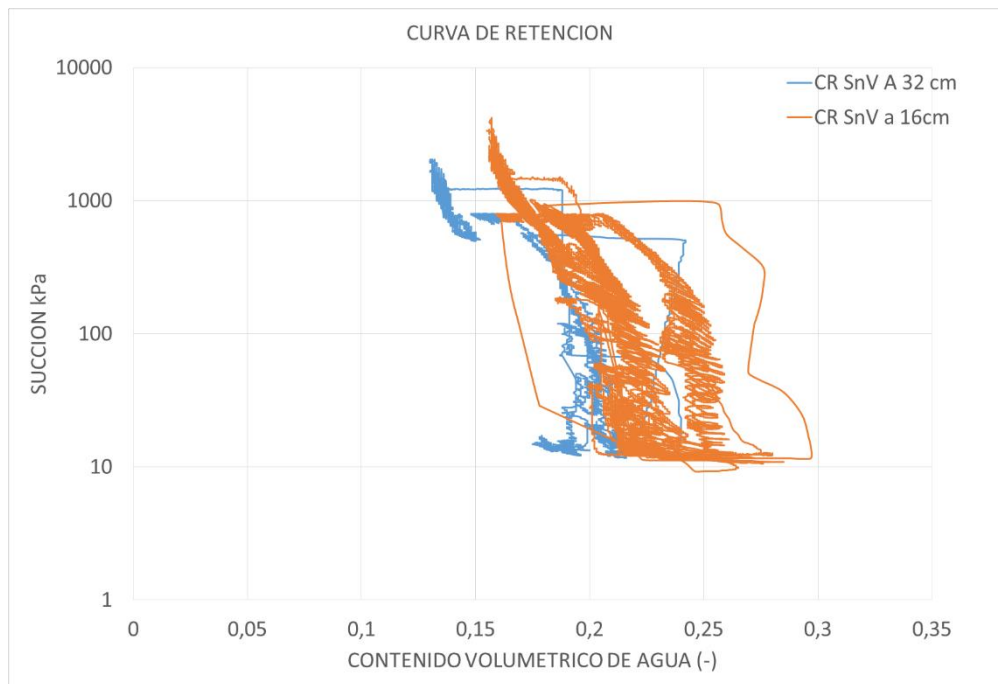


Fig. 67 Curva de retención del Talud Sur no Vegetado de 16 y 32 cm de profundidad Año 2017-2018

En la Fig. 69, se muestra un periodo de secado a 16 y 32 cm de profundidad, donde la succión asciende de 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores) 2000 kPa promedio y en la curva de 16 y 32 cm de profundidad una entrada de aire a 1000 y 800 kPa promedio respectivamente.

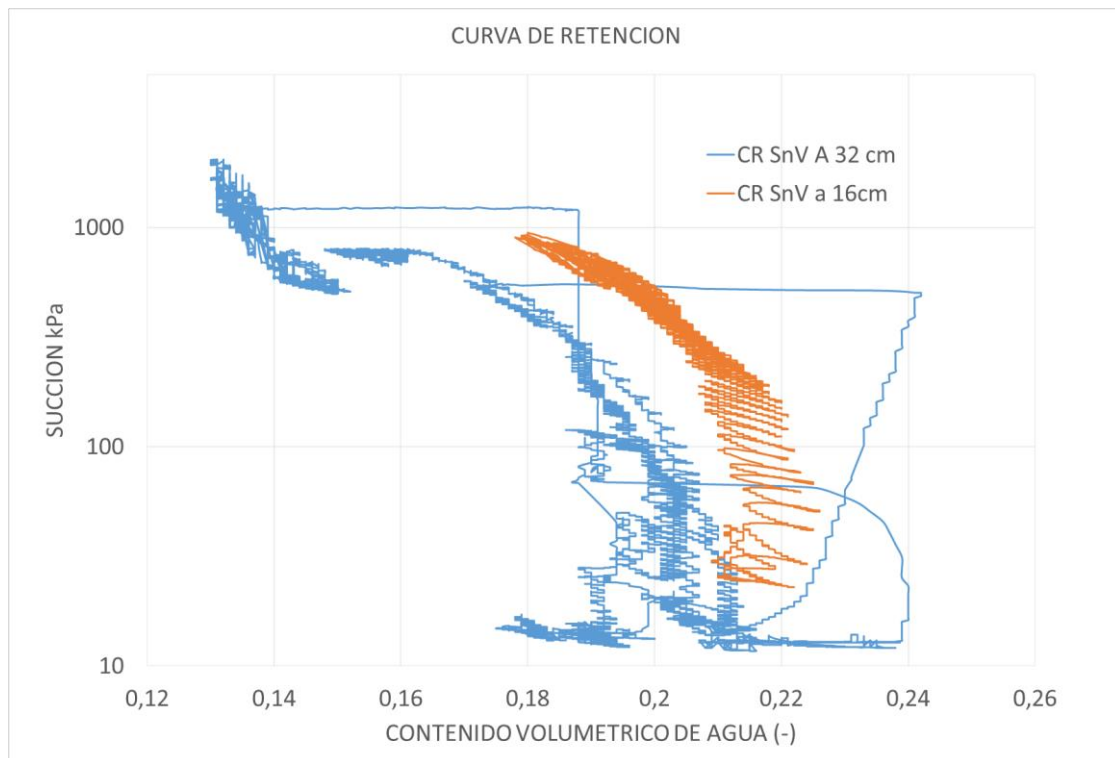


Fig. 68 Curva de retención del Talud Sur no Vegetado de 16 y 32 cm de profundidad (secado)

Similar a lo que se observa en el lado norte no vegetado, en las Fig. 84 y Fig. 85 se muestran periodos de mojado a 16 y 32 cm de profundidad, donde la succión desciende a 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores). También en la curva de 16 cm de profundidad se visualiza una pendiente mayor de mojado que de secado y a 36cm los periodos de mojado son cortos y la succión baja rápidamente, sin poder visualizar valores por debajo de 10 kPa.

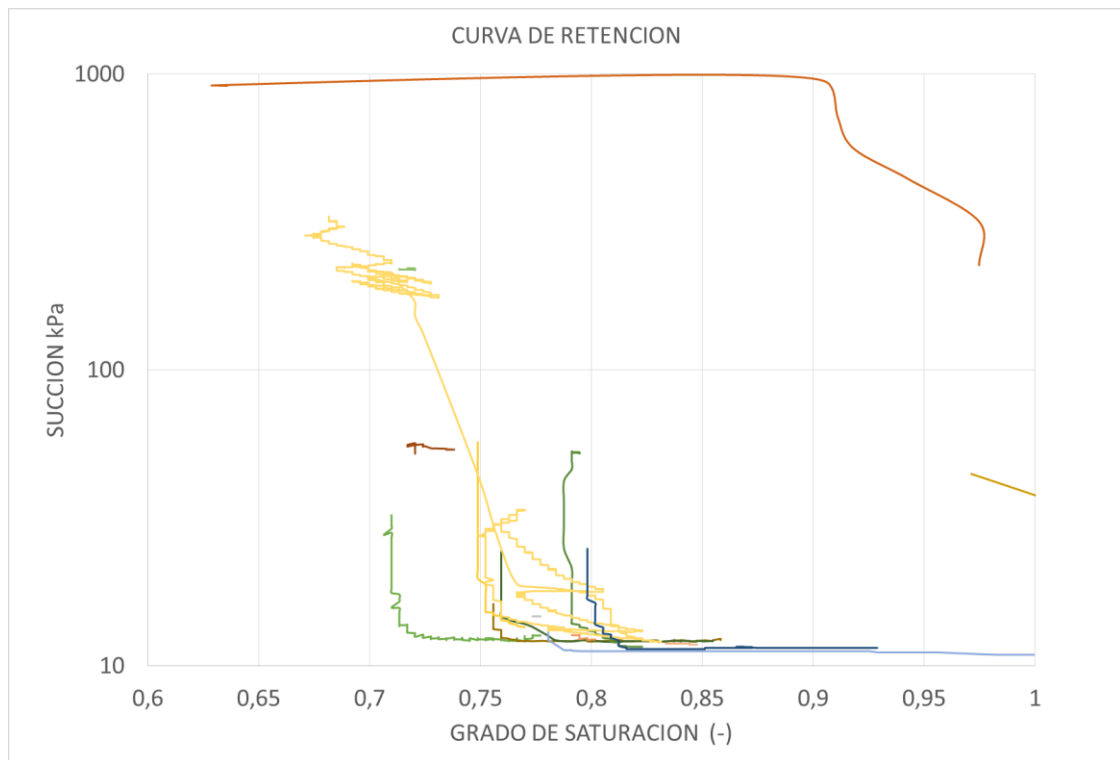


Fig. 69 Curva de retención del Talud Sur no Vegetado de 16 cm de profundidad (mojado)

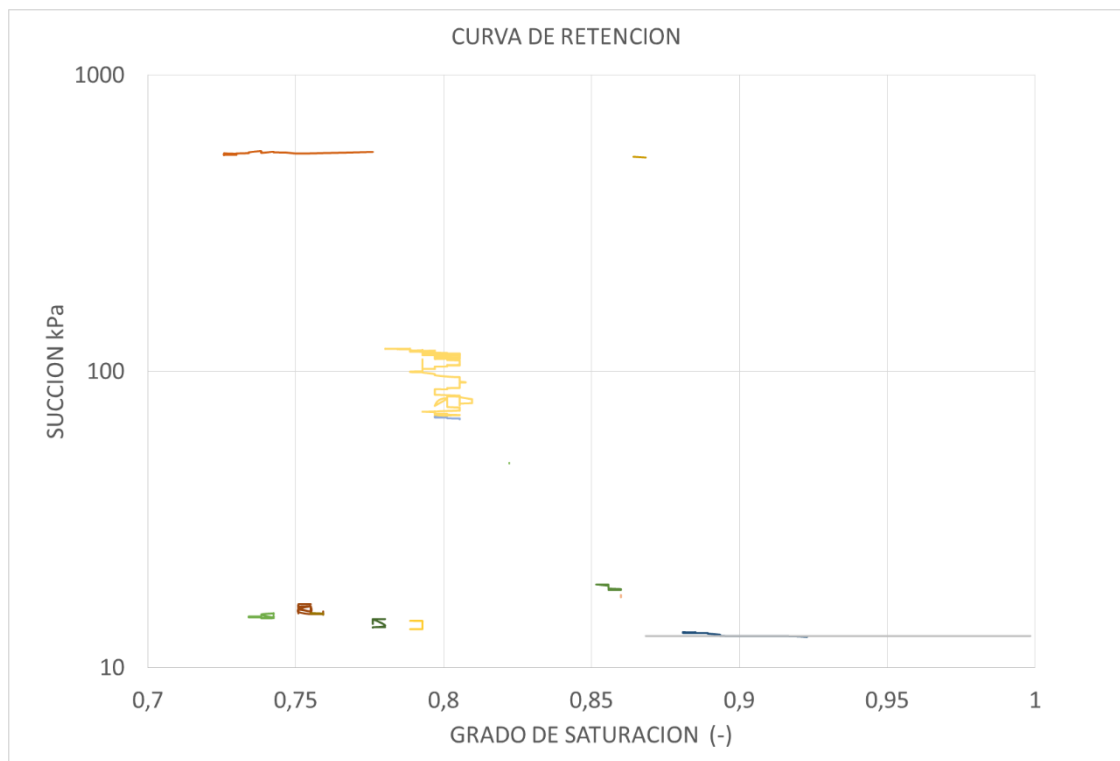


Fig. 70 Curva de retención del Talud Sur no Vegetado de 32 cm de profundidad (mojado)

3.3.2.2 Sur Vegetado

Similar a lo descrito anteriormente en la Fig. 71 Curva de retención Talud Sur Vegetado de 16, 36 y 43 cm de profundidad Año 2017-2018, se observa para una succión de cero el máximo (CVW) es de 0.29, 0.217 y 0.335 a 16, 36 y 43 cm de profundidad respectivamente. Su succión a diferencia del lado sur no vegetado y del norte, es mucho mayor del orden de 100000 kPa.

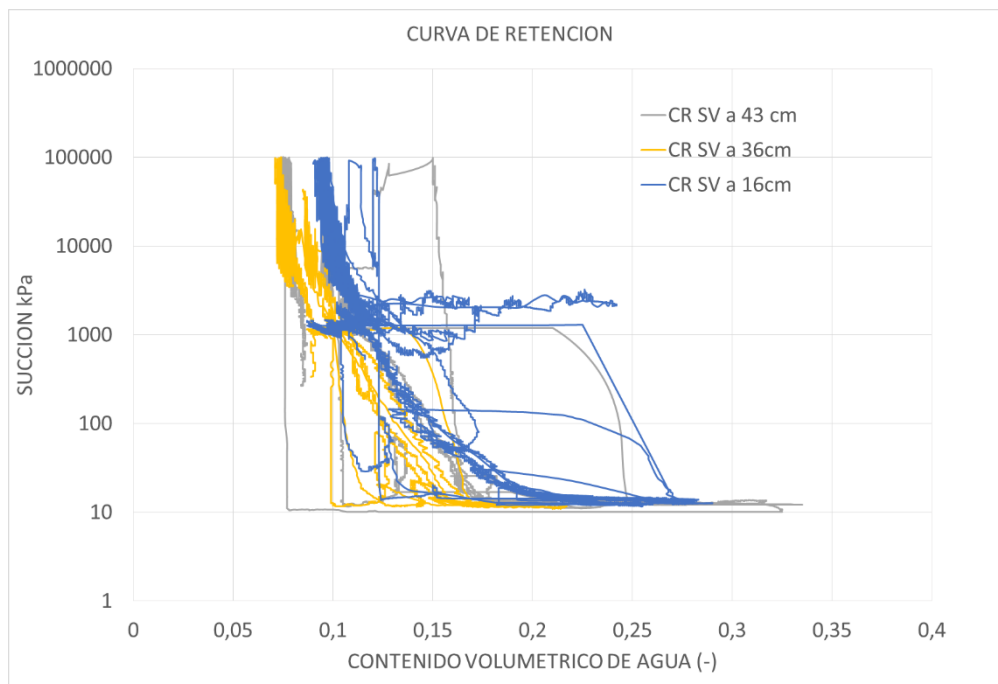


Fig. 71 Curva de retención Talud Sur Vegetado de 16, 36 y 43 cm de profundidad Año 2017-2018

En la Fig. 72, se muestra un periodo de secado a 16 y 36 cm de profundidad, donde la succión asciende de 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores) a 1000 kPa promedio.

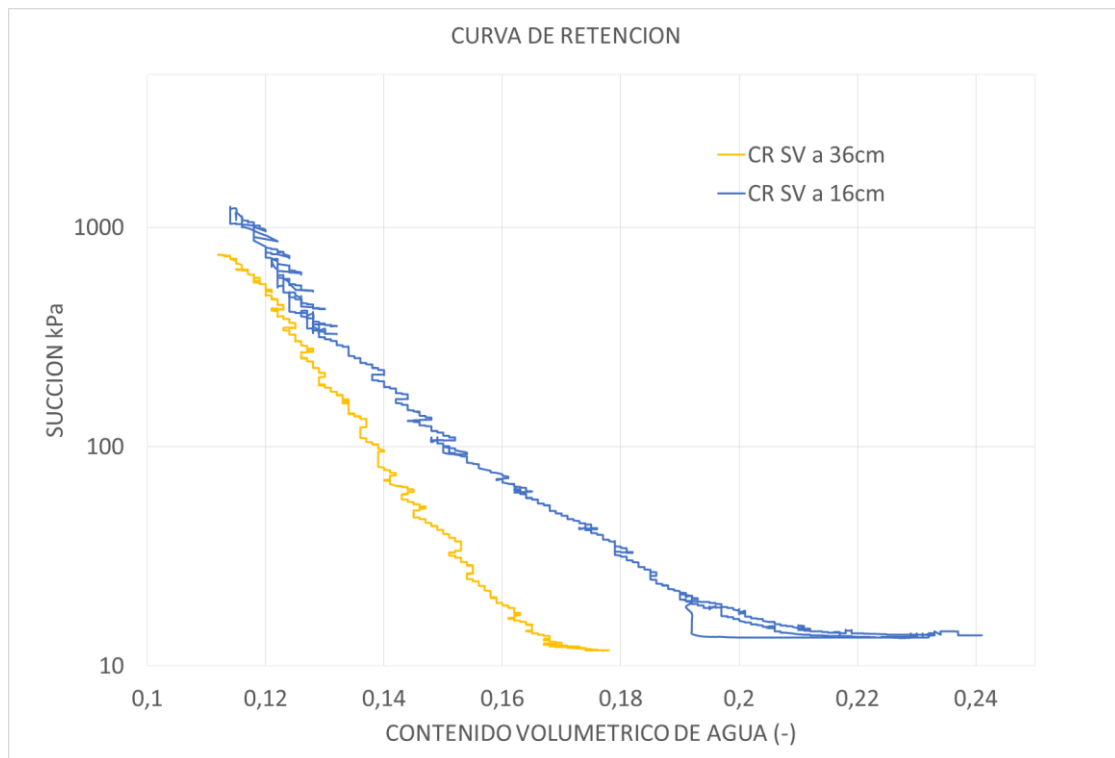


Fig. 72 Curva de retención Talud Sur Vegetado de 16 y 36 cm de profundidad (secado)

Similar a lo que se observa en el lado sur no vegetado, en las Fig. 73 y Fig. 74 se muestran periodos de mojado a 16 y 32 cm de profundidad, donde la succión desciende a 10 kPa (valor mínimo de lectura de los sensores). En la curva de 16 cm de profundidad se visualiza una pendiente mayor de mojado que de secado y a 36cm los periodos de mojado son cortos y la succión baja rápidamente, sin poder visualizar valores por debajo de 10 kPa.



Fig. 73 Curva de retención Talud Sur Vegetado de 16 cm de profundidad (mojado)

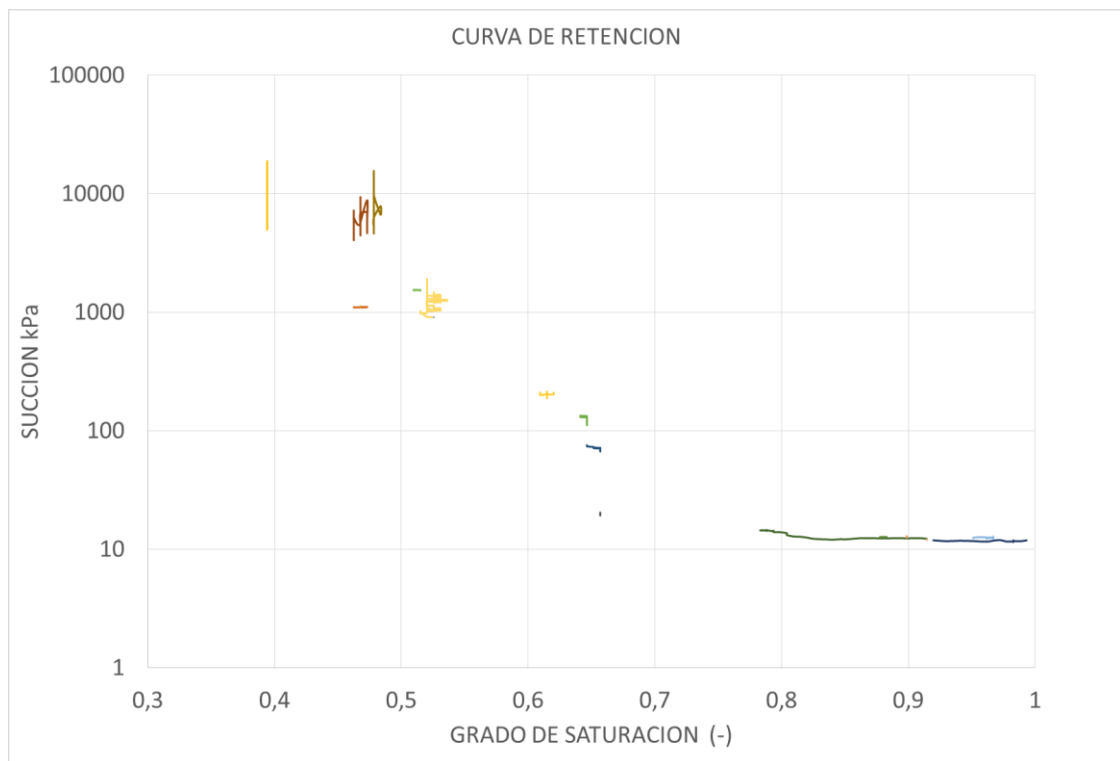


Fig. 74 Curva de retención Talud Sur Vegetado de 36 cm de profundidad (mojado)

3.3.2.3 Análisis comparativo Vegetado-No vegetado

A 16 cm de profundidad lado sur como se ve en la Fig. 75 en azul se puede visualizar que el suelo con vegetación es capaz de contener casi el mismo contenido volumétrico de agua (CVW) en un rango de 0.29, ganar una mucha mayor succión con diferencia de 99459 a 4195 kPa y reducir su contenido volumétrico de agua sustancialmente. Hay que tener en cuenta que el punto de marchitez de la vegetación del orden de 1500 a 2000 kPa, muy por debajo de las succiones alcanzadas en verano. Por ese motivo en ese periodo es muy difícil que la vegetación pueda sobrevivir.

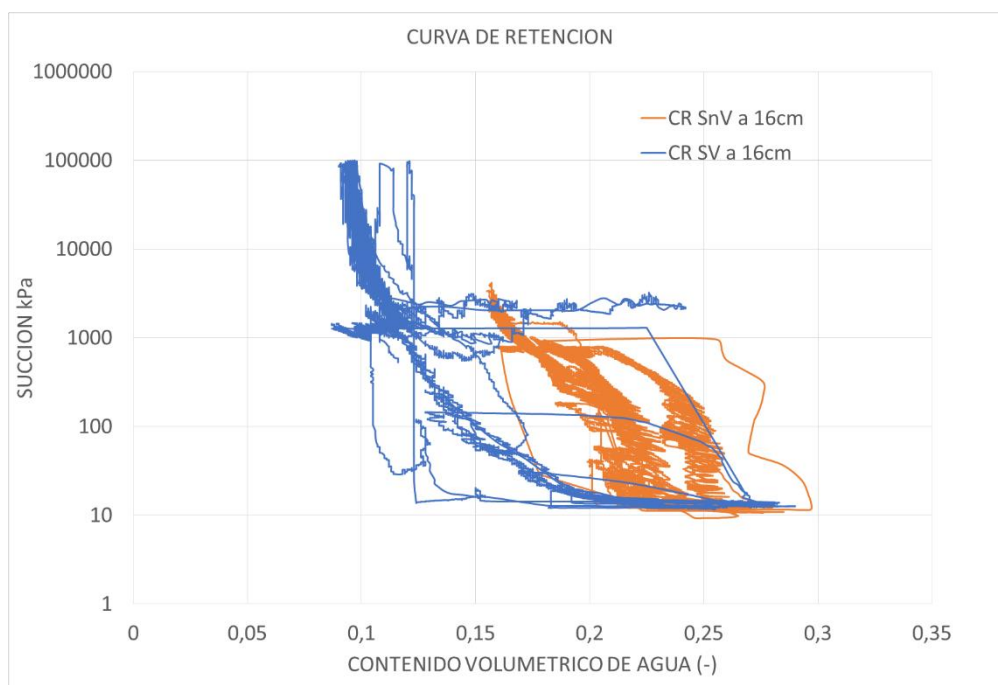


Fig. 75 Curva de retención Talud Sur Vegetado- no Vegetado de 16 cm de profundidad Año 2017-2018

A 32 y 36 cm de profundidad lado sur como se ve en la Fig. 76 en azul se puede visualizar que el suelo con vegetación es capaz de contener casi el mismo contenido volumétrico de agua (CVW) en un rango de 0.22, ganar una mucha mayor succión con diferencia de 98930 a 2048 kPa y reducir su contenido volumétrico de agua sustancialmente.

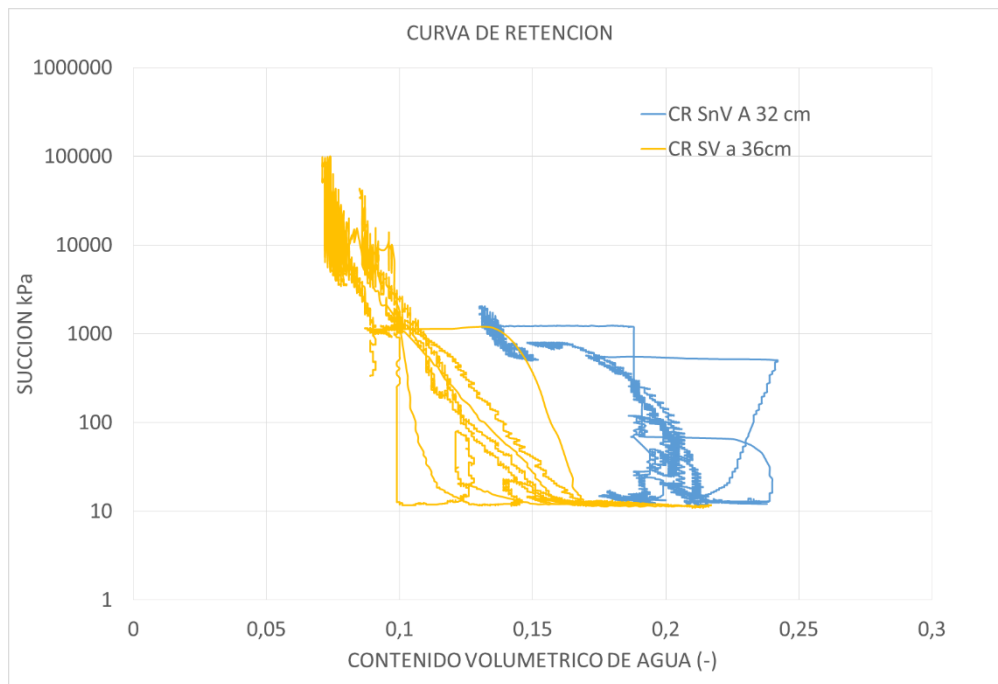


Fig. 76 Curva de retención Talud Sur Vegetado- no Vegetado de 32 y 36 cm de profundidad Año 2017-2018

3.3.3 Definición de la curva de retención

Para definir la curva de retención (Ver ANEXO 2), se distingue un comportamiento de doble porosidad, debido a que en succiones bajas el material almacena la suficiente cantidad de agua capaz de llenar parcialmente los poros de la macro estructura y suficiente para saturar la micro estructura. A más de esto no se puede definir una sola porosidad porque el material está en constante aumento y reducción de agua que cambian las condiciones iniciales del suelo, el aumento del contenido volumétrico de agua incrementa la saturación pero puede reducir la porosidad (Romero et al., 2011). Dicho a lo anterior se estiman valores que abarque o promedie un comportamiento similar a lo observado como se muestra en las siguientes figuras.

3.3.3.1 Curva de retención lado norte no vegetado

Se define por lo tanto un material de doble porosidad y se utiliza la ecuación de Van Genuchten (1980) para curvas de retención en la Fig. 77. En la Tabla 1 se puede ver los parámetros tomados para definir la curva.

Para definir la porosidad del material se presume que su máximo contenido volumétrico de agua es igual a una saturación de 1. Se estima un factor de ponderación de 0.63, en la macroestructura la entrada de aire se estima a los 1500 kPa y un factor de forma de 0.9 y en la microestructura la entrada de aire se estima a 12kPa y un factor de forma de 0.5.

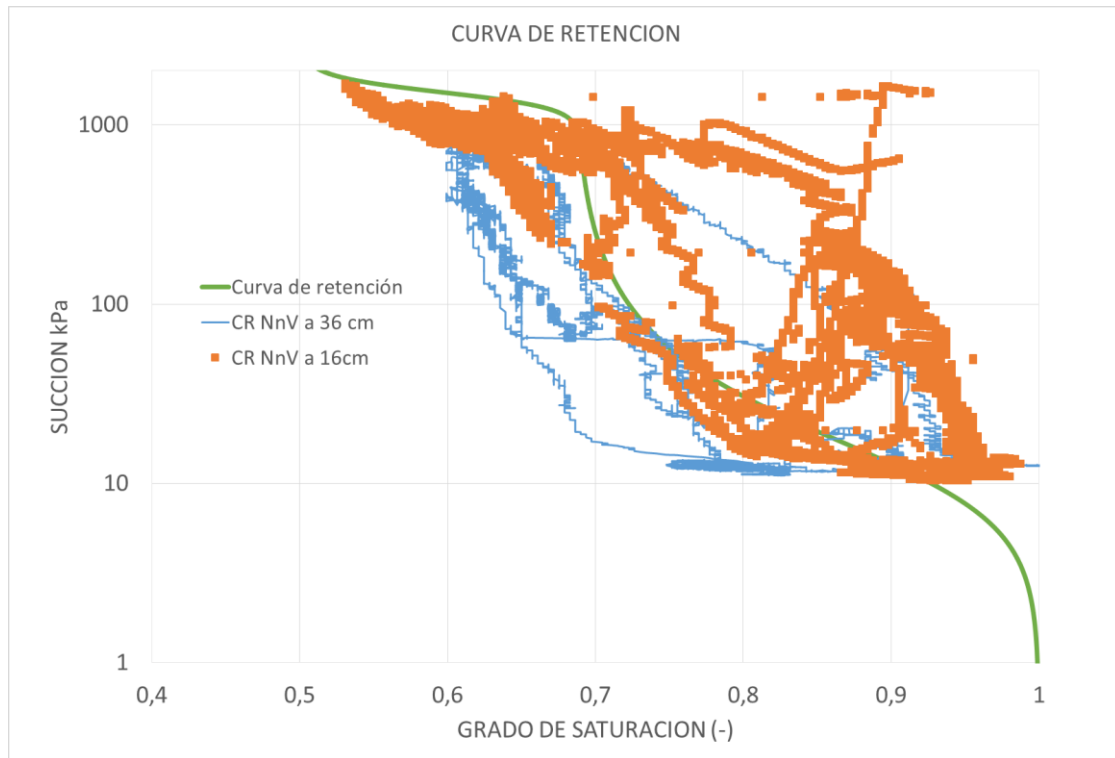


Fig. 77 Definición de curva de retención Talud Norte no Vegetado hasta 36 cm de profundidad Año 2017-2018

MACROESTRUCTURA		MICROESTRUCTURA	
W	0,63	W	0,63
Sru	1	Sru	1
Sro	0,5	Sro	0,5
λ	0,9	λ	0,5
Po	1500	Po	12
e	0,38		

Tabla 1 Parámetros de la curva de retención talud Norte no Vegetado hasta 36 cm

3.3.3.2 Curva de retención lado norte vegetado

Para el lado norte vegetado se definen dos curvas de retención. La primera se visualiza en la Fig. 78 y se estima un factor de ponderación de 0.63, en la macroestructura la entrada de aire se estima a los 1000 kPa y un factor de forma de 0.8 y en la microestructura la entrada de aire se estima a 12kPa y un factor de forma de 0.7.

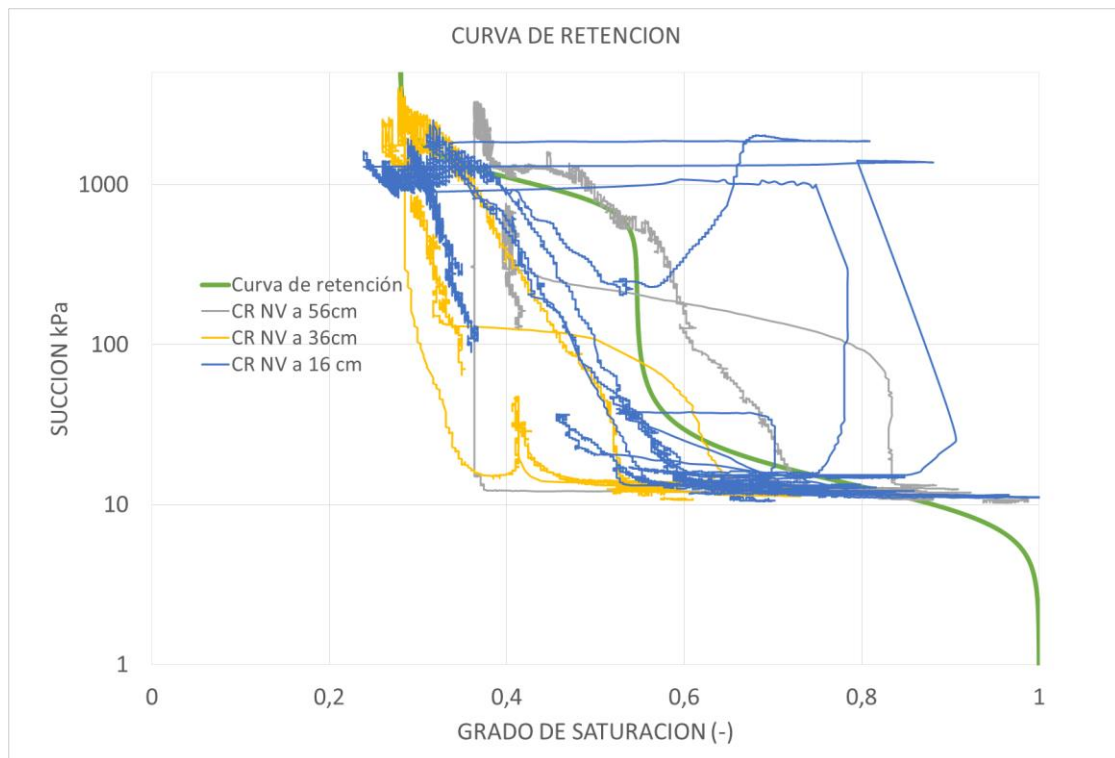


Fig. 78 Primera definición de curva de retención del Talud Norte Vegetado hasta 56 cm de profundidad Año 2017-2018

MACROESTRUCTURA		MICROESTRUCTURA	
W	0,63	W	0,63
Sru	1	Sru	1
Sro	0,28	Sro	0,28
λ	0,8	λ	0,7
Po	1000	Po	12
e	0,38		

Tabla 2 Parámetros de la curva de retención Talud Norte Vegetado hasta 56 cm

La segunda curva de retención se visualiza en la Fig. 79 y se estima un factor de ponderación de 0.42, en la macroestructura la entrada de aire a los 110 kPa y un factor

de forma de 0.7 y en la microestructura la entrada de aire se estima a 5 kPa y un factor de forma de 0.7.

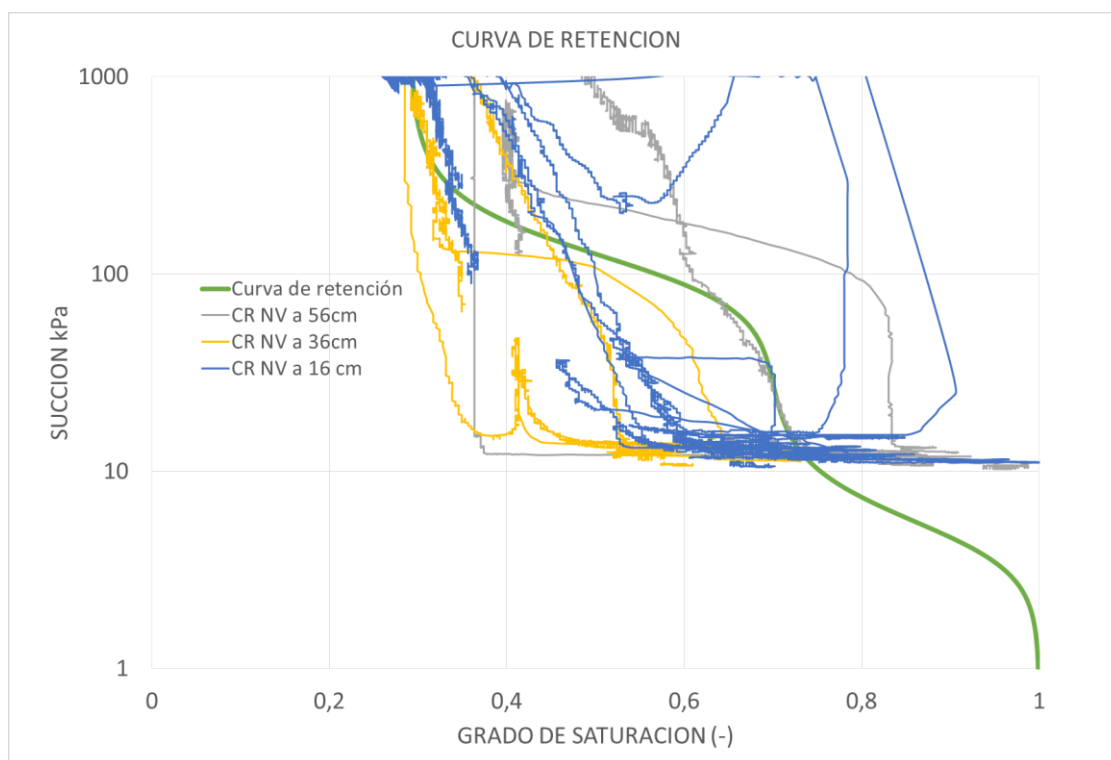


Fig. 79 Segunda definición de curva de retención del Talud Norte Vegetado hasta 56 cm de profundidad Año 2017-2018

MACROESTRUCTURA		MICROESTRUCTURA	
W	0,42	W	0,42
Sru	1	Sru	1
Sro	0,3	Sro	0,28
λ	0,7	λ	0,7
Po	110	Po	5
e	0,38		

Tabla 3 Parámetros de la curva de retención Talud Norte Vegetado hasta 56 cm

En resumen el comportamiento del lado vegetado tiene definido dos curvas de retención a diferencia del lado no vegetado. El lado vegetado tiene dos entradas de aire en la macroestructura a 1000 y a 110 kPa y el lado no vegetado a 1500 kPa.

3.3.3.3 Curva retención Sur no vegetada

Para el lado sur no vegetado se define una curva de retención visualizada en la Fig. 80. Se estima un factor de ponderación de 0.55, en la macroestructura la entrada de aire se estima a los 800 kPa y un factor de forma de 0.85 y en la microestructura la entrada de aire se estima a 12kPa y un factor de forma de 0.65.

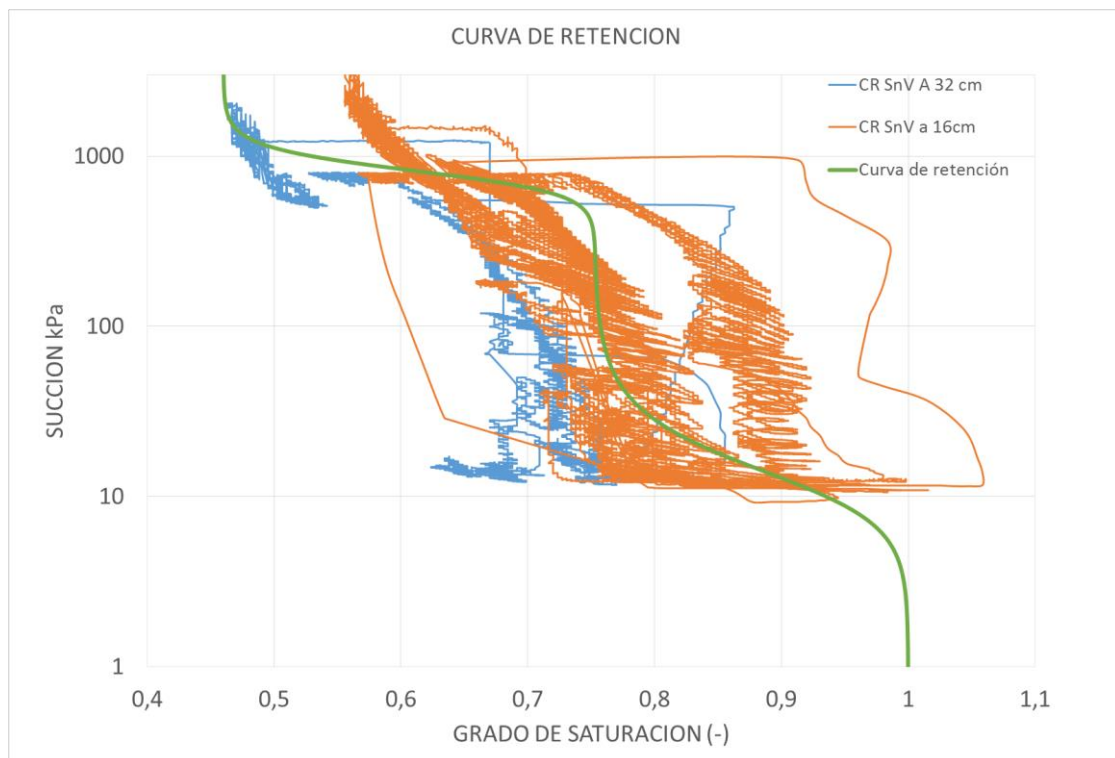


Fig. 80 Definición de curva de retención Talud Sur no Vegetado hasta 36 cm de profundidad Año 2017-2018

MACROESTRUCTURA		MICROESTRUCTURA	
W	0,55	W	0,55
Sru	1	Sru	1
Sro	0,35	Sro	0,55
λ	0,85	Λ	0,65
Po	800	Po	12
e	0,39		

Tabla 4 Parámetros de la curva de retención Talud Sur no Vegetado hasta 36 cm

3.3.3.4 Curva de retención Sur vegetada

Para el lado sur no vegetado se define una curva de retención visualizada en la Fig. 80. Se estima un factor de ponderación de 0.45, en la macroestructura la entrada de aire se estima a los 1000 kPa y un factor de forma de 0.8 y en la microestructura la entrada de aire se estima a 5 kPa y un factor de forma de 0.7.

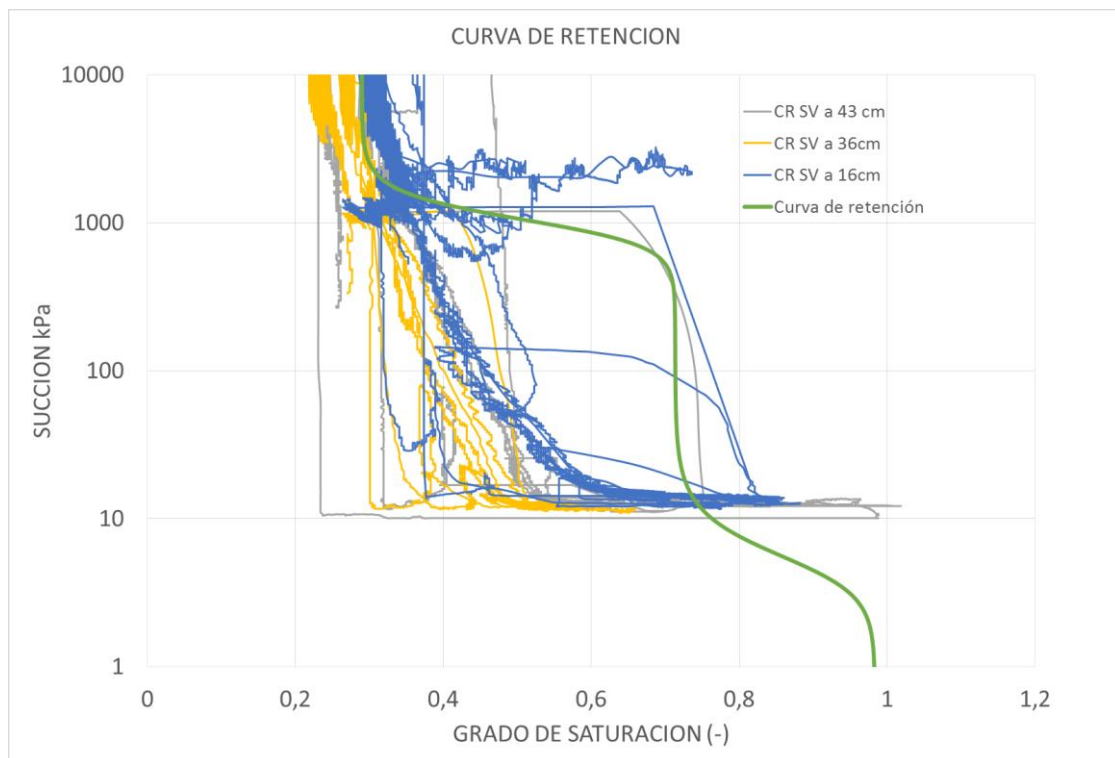


Fig. 81 Definición de curva de retención Talud Sur Vegetado hasta 43 cm de profundidad Año 2017-2018

MACROESTRUCTURA		MICROESTRUCTURA	
W	0,45	W	0,45
Sru	1	Sru	1
Sro	0,2	Sro	0,4
λ	0,8	Λ	0,7
Po	1000	Po	5
e	0,39		

Tabla 5 Parámetros de la curva de retención Talud Sur Vegetado hasta 43 cm

En la Tabla 6 y Fig. 82 se visualiza cada parámetro estimado del lado norte y sur para las curvas de retención. En la macroestructura no existe mayor diferencia en los factores de forma y salvo por la entrada de aire en una de las curvas del lado norte vegetado a 110 kPa, las demás oscilan una entrada de aire a 1000 kPa. El lado sur presenta una mayor porosidad y la saturación inicial de 0.2 a 0.35, mientras que el lado norte una menor porosidad y una saturación inicial de 0.3 a 0.5. En la microestructura la entrada de aire esta entre 5 y 12 kPa en el lado sur y norte, y una saturación inicial menor en lado Norte de 0.28 al lado sur de 0.4-0.55.

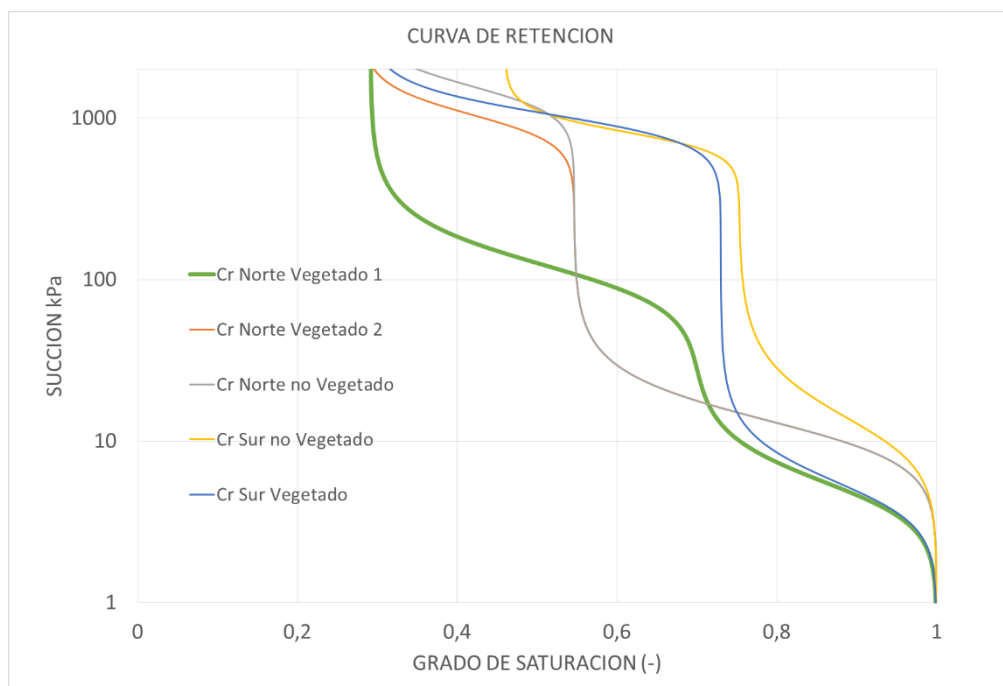


Fig. 82 Definición de curva de retención de todas las zonas del terraplén (Año 2017-2018)

MACROESTRUCTURA	Sur vegetada	Sur no vegetada	Norte vegetado 1	Norte vegetado 2	Norte no vegetado
W	0,45	0,55	0,42	0,63	0,63
Sru	1	1	1	1	1
Sro	0,2	0,35	0,3	0,28	0,5
Λ	0,8	0,85	0,7	0,8	0,9
Po	1000	800	110	1000	1500
E	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38
MICROESTRUCTURA					
W	0,45	0,55	0,42	0,63	0,63
Sru	1	1	1	1	1
Sro	0,4	0,55	0,28	0,28	0,28
Λ	0,7	0,65	0,7	0,7	0,7
Po	5	12	5	12	12

Tabla 6 Resumen de parámetros de la curva de retención del Talud Sur y Norte-Vegetado y No Vegetado

3.4 Estimación empírica para el incremento de contenido volumétrico de agua

Teniendo datos de dos años de registro, donde se puede evaluar el incremento del contenido volumétrico en función del incremento de precipitación desde un contenido volumétrico inicial, se puede establecer una regresión en función a la interacción entre estas tres variables (Ver Fig. 83).

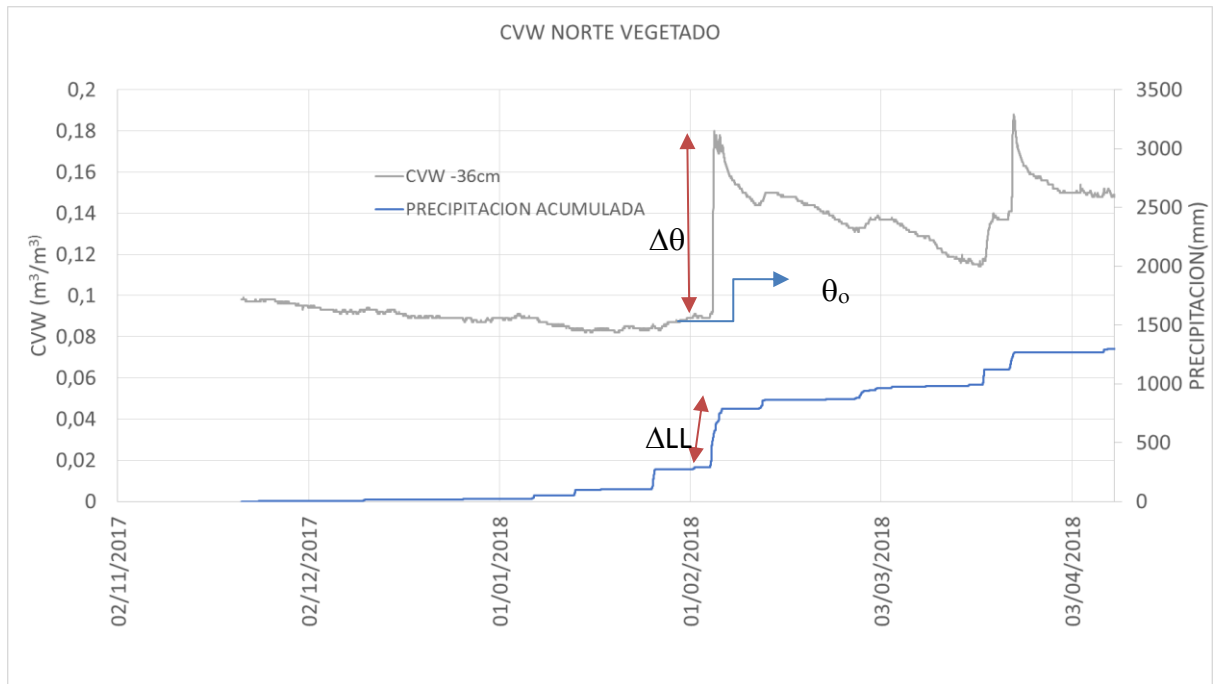


Fig. 83 Ejemplo ilustrativo de un incremento volumétrico de agua ($\Delta\theta$) en función de un incremento de lluvia acumulada en un evento (ΔLL) y el contenido volumétrico inicial (θ_0) en lado Norte Vegetado

A continuación se presenta la formula empírica para determinar este incremento del contenido volumétrico y sus constantes dependiendo del tipo de suelo:

$$\Delta\theta = (\Delta LL * a) + (\theta_0 * b) + c \quad ec 1$$

Donde:

$\Delta\theta$: Incremento de del Contenido Volumétrico de Agua

ΔLL : Incremento de la Lluvia acumulada en un evento

θ_0 : Contenido volumétrico inicial

a,b y c: constantes obtenidas por ajuste utilizando mínimos cuadrados

En la Fig. 84, Fig. 85, Fig. 86 y Fig. 87 se muestran para las distintas zonas del terraplén las gráficas relacionadas con curvas de igual incremento de contenido volumétrico de

agua, obtenida con la función bilineal para estimar el incremento de contenido volumétrico en función del incremento de precipitación y el contenido inicial de volumen y tres constantes.

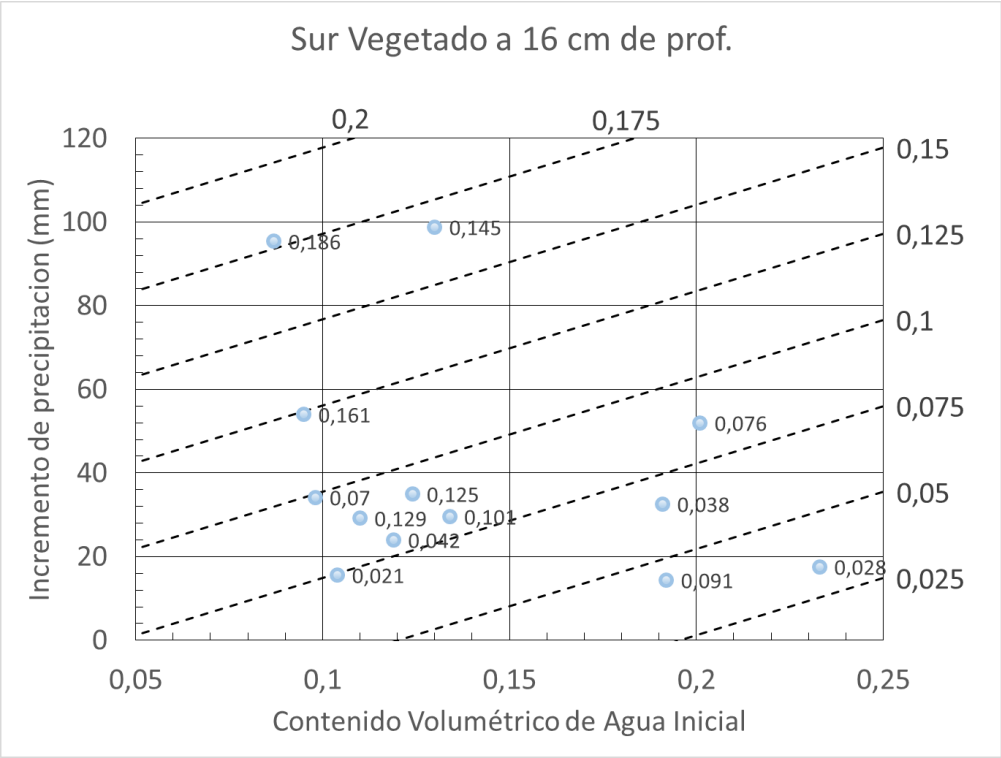


Fig. 84 Curvas de igual incremento del contenido volumétrico de agua en función a la precipitación y el contenido volumétrico de agua inicial a 16 cm de profundidad, lado Sur Vegetado

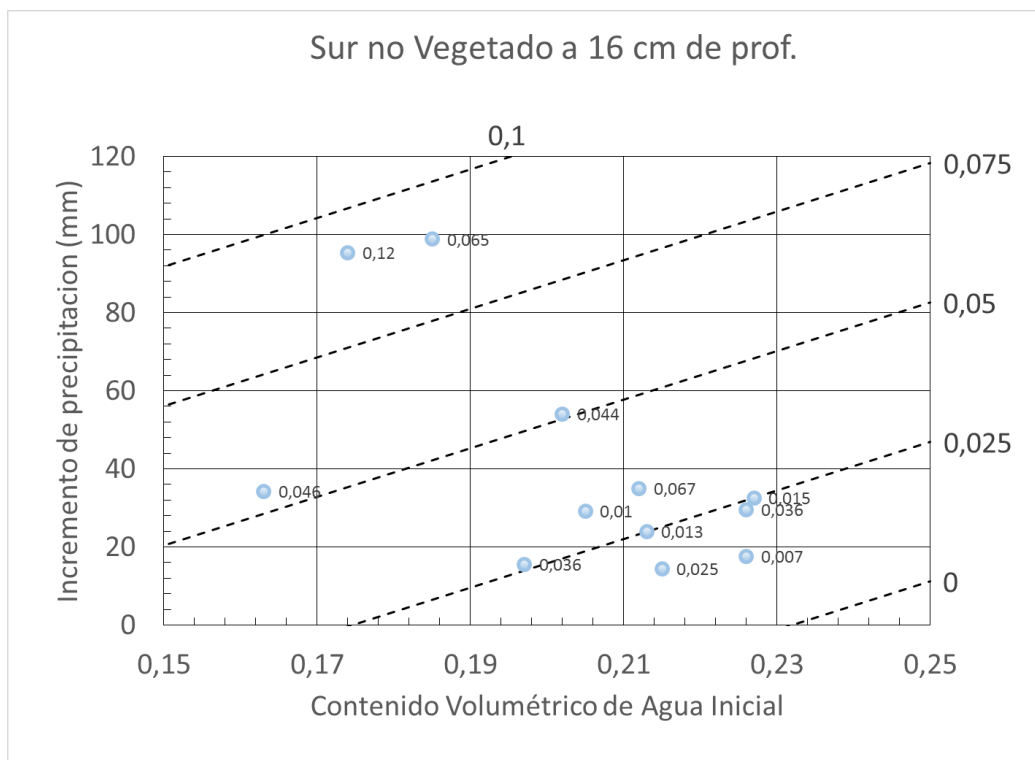


Fig. 85 Curvas de igual incremento del contenido volumétrico de agua en función a la precipitación y el contenido volumétrico de agua inicial a 16 cm de profundidad, lado Sur no Vegetado

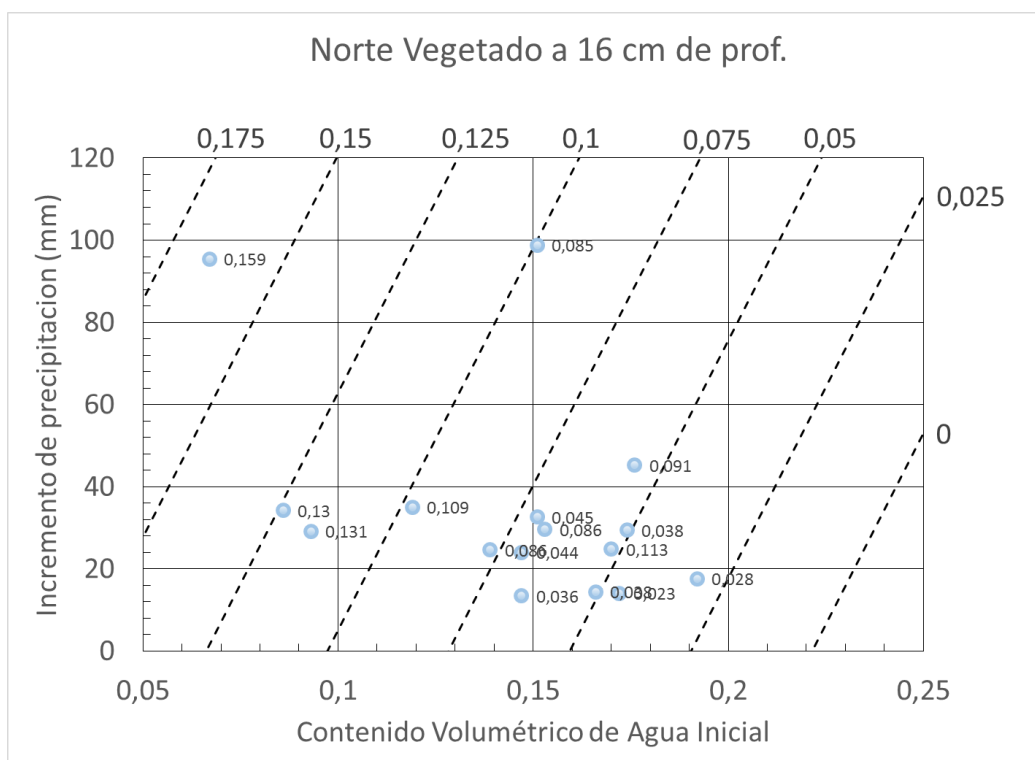


Fig. 86 Curvas de igual incremento del contenido volumétrico de agua en función a la precipitación y el contenido volumétrico de agua inicial a 16 cm de profundidad, Norte Vegetado

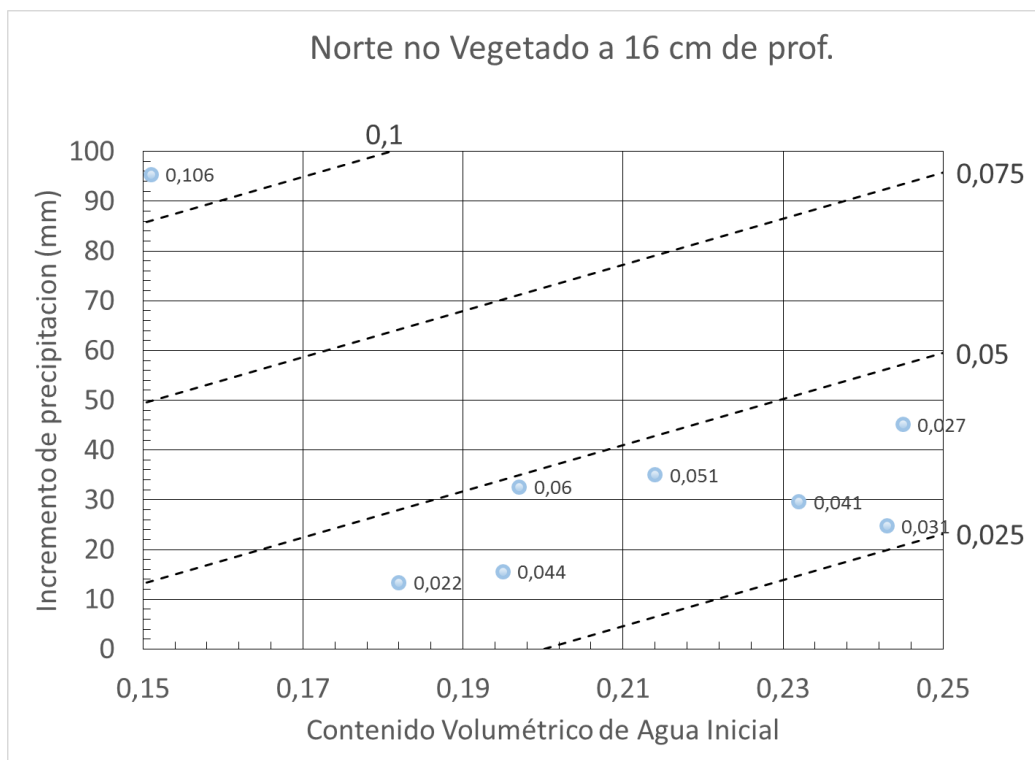


Fig. 87 Curvas de igual incremento del contenido volumétrico de agua en función a la precipitación y el contenido volumétrico de agua inicial a 16 cm de profundidad, Norte no Vegetado

En la siguiente Tabla 7 y en la Fig. 88 se muestran las constantes obtenidas en función de la zona del terraplén. Se puede distinguir que el lado norte vegetado está mucho más afectado por el incremento de lluvia y su contenido volumétrico inicial que el resto de las zonas. Más o menos difiere en la $\delta(\Delta\theta)/\delta LL$ (derivada del incremento de contenido volumétrico de agua respecto al incremento de precipitación) con 0.123 mm^{-1} , en la $\delta(\Delta\theta)/\delta(\theta_0)$ (derivada del incremento de contenido volumétrico de agua respecto al contenido volumétrico inicial) con 0.4 y en el parámetro “c” con 0.09.

	$\delta(\Delta\theta)/\delta LL$ (mm^{-1})	$\delta(\Delta\theta)/\delta(\theta_0)$	c
Norte Vegetado	0,1238662	-0,8051208	0,00907949
Norte no Vegetado	0,00068881	-0,31954436	0,08890854
Sur Vegetado	0,00121536	-0,33272509	0,09006453
Sur no Vegetado	0,00070015	-0,43581927	0,10110209

Tabla 7 Constantes para el tipo de zona del terraplén a 16 cm

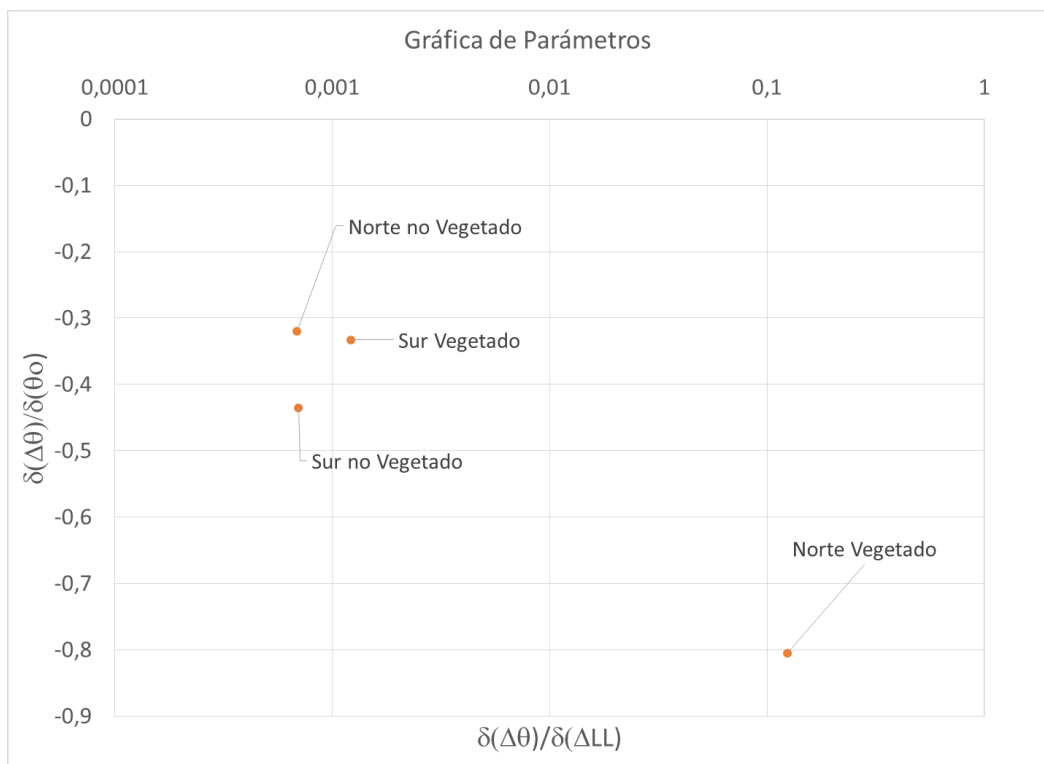


Fig. 88 Gráfica de parámetros a y b

4. Infiltración, escorrentía y erosión

El ciclo hidrológico no tiene fin, debido a que sus diferentes procesos ocurren uno tras otro y provocan un constante cambio en la superficie de la tierra (erosión). Como se ve en la Fig. 89 el agua se evapora a la atmósfera, se condensa y se precipita a la superficie de la tierra. Una vez el agua tiene contacto con la superficie hay un porcentaje que absorbe la vegetación, otro que se convierte en agua superficial, otra que infiltra, otro que fluye subterráneamente (subsuperficial) y finalmente el agua que se descarga en el pie del talud, que es la suma del flujo superficial y el flujo subsuperficial, es la escorrentía (Chow et al. 1994).

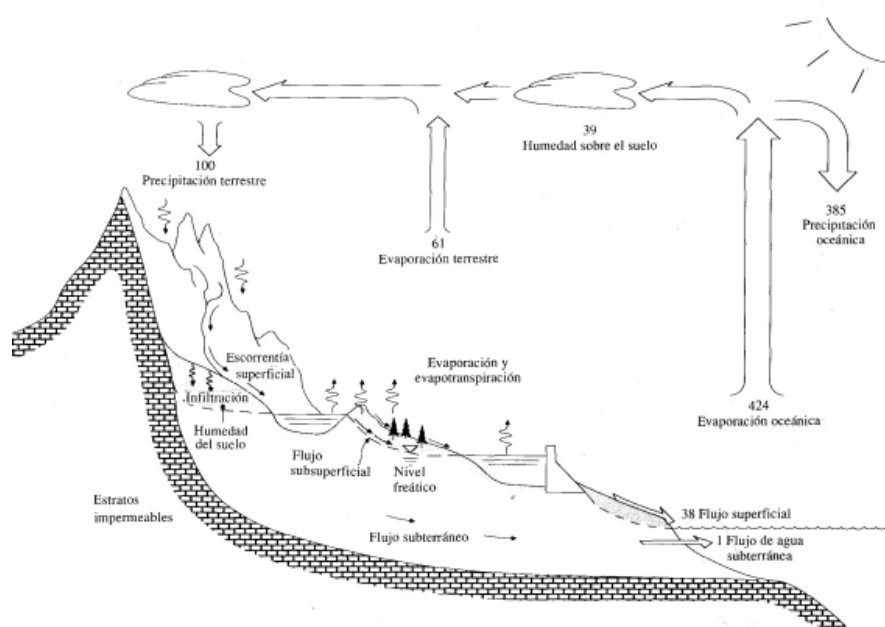


Fig. 89 Ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global anual en unidades relativas a un valor de 100 para la tasa de precipitación terrestre (Chow et al. 1994)

En el desarrollo de este trabajo se ha tomado ciertos parámetros de diseño presentados por (Guachizaca Contenido, 2018) para continuar con el desarrollo del proyecto del sistema de medida de la escorrentía en las 4 zonas del terraplén. Para relacionar el material erosionado respecto al ciclo hidrológico en el modelo ejecutado se van a evaluar tres parámetros explícitamente precipitación, infiltración (incluye flujo subsuperficial) y flujo superficial (escorrentía). De manera simple el agua cuantificada por precipitación menos el agua medida en escorrentía daría como resultado el agua

infiltrada. A más de esto se proponen ensayos de campo, laboratorio y funciones relacionadas con el tema para poder comparar y ajustar debidamente las medidas realizadas.

4.1 Precipitación

La precipitación es todo tipo de estado en el que el agua cae a superficie, sea esta nieve, lluvia o granizo. Esto ocurre cuando una masa de agua se eleva en la atmosfera y está condense una parte de la humedad (Ver Fig. 90) (Chow et al. 1994).

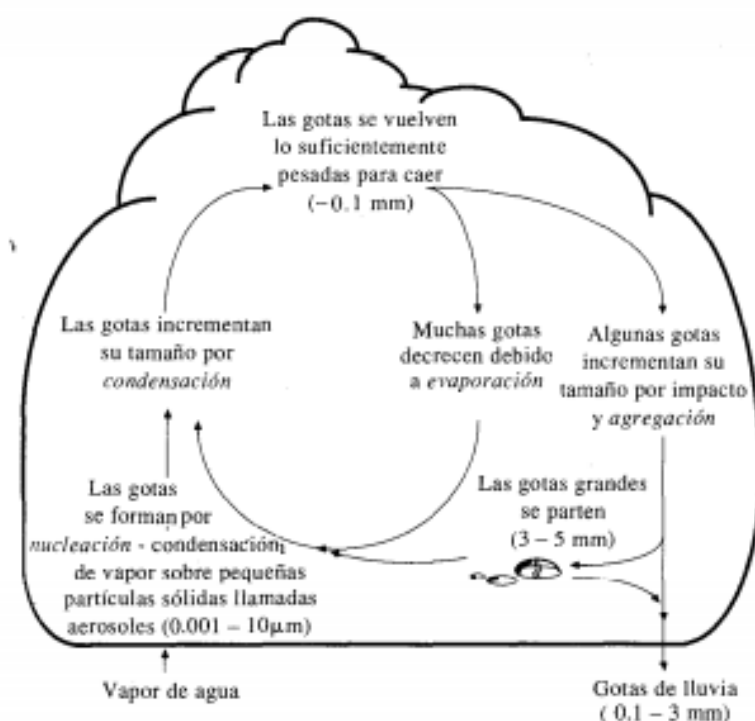


Fig. 90 Proceso de precipitación (Chow et al. 1994)

Como primer ejemplo se analiza un episodio de lluvia el día 9 de noviembre de 2018 en el lado norte no vegetado, pero una vez se ajuste el modelo se tomará el mismo procedimiento para los sectores restantes. Se toman las medidas tomadas por el pluviómetro y se multiplica por el área en planta a analizar (Ver Tabla 8), como detalla a continuación:

Datos del Terraplén-NnV

Largo (A)	5,02	m
Ancho (B)	3,43	m
Área en planta(A _p)	17,23	m ²

Tabla 8 Datos del Terraplén Sector Norte No Vegetado

$$V_{LL} = \frac{A_p * h_{LLa}}{1000}$$

ec 2

Donde:

V_{LL}: Volumen de lluvia en m³ en un periodo de tiempo

A_p: Área en planta del sector que le corresponde en m²

h_{LLa}: Altura de precipitación acumulada en mm

La Fig. 91 muestra las medidas de precipitación del día 9 de noviembre del 2018 desde las 0:00 hasta las 9:00 horas.

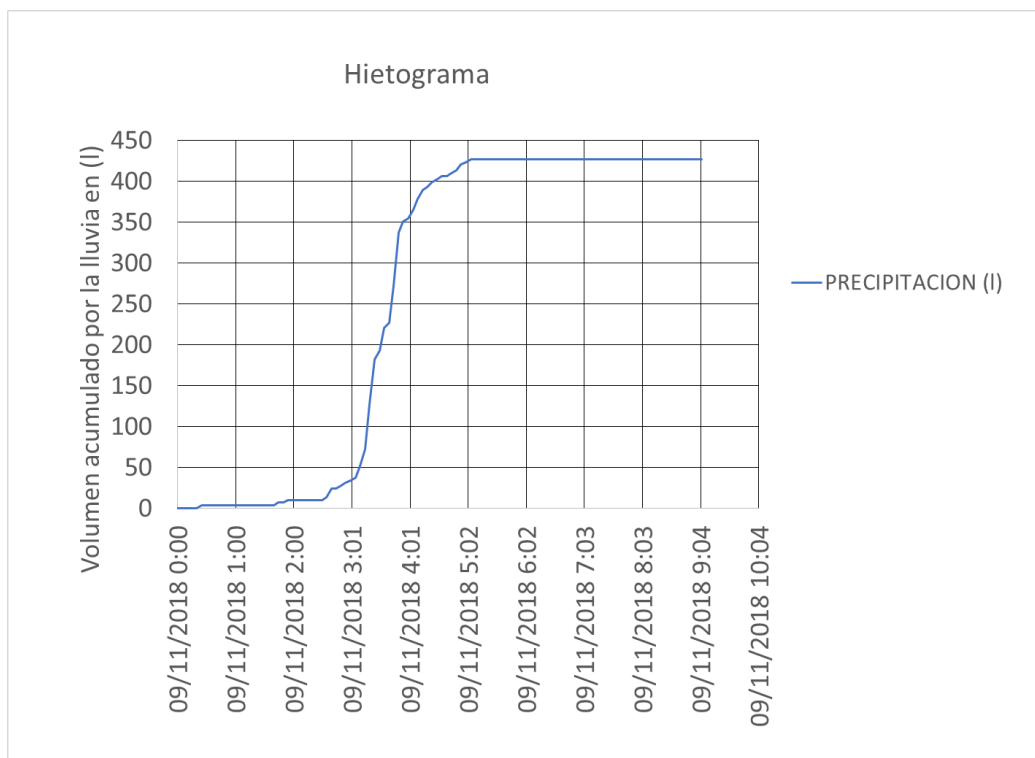


Fig. 91 Volumen de la precipitación en el área norte no vegetado en relación al tiempo

4.2 Escorrentía

El agua superficial es el agua que corre sobre la superficie y está continuamente interactuando con la atmosfera y el agua subsuperficial. En un principio, hasta que el agua logre infiltrar parte de la precipitación se encuentra almacenada superficialmente. Una porción del agua almacenada superficialmente es retenida y evaporada, mientras que otra es detenida por corto plazo y da lugar al flujo no saturado a través del suelo cerca de superficie, al flujo subterráneo y escorrentía (Ver Fig. 92) (Chow et al. 1994).

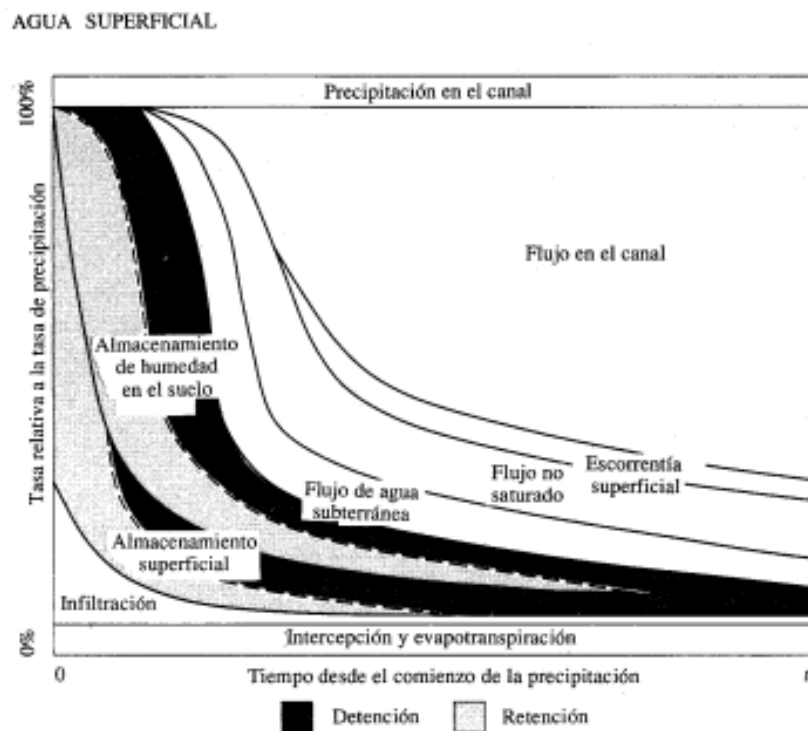


Fig. 92 Distribución de la precipitación en función del tiempo (Chow et al., 1994)

Se han colocado cunetas en los costados del terraplén para que se recoja el agua de escorrentía. En la terminal de cada una de las cunetas (lado norte no vegetado) se coloca un micro procesador Arduino conectado a un sensor de distancia por ultrasonido HC-SR04, una placa que permite el paso del agua por una geometría concreta y con un reloj de tiempo real (RTC DS3231) para grabar las lecturas en función del tiempo. Se configura el reloj en para que mida en tiempo internacional y que las lecturas se puedan asociar a las medidas del resto de sensores. Sabiendo la altura de agua, la geometría y el tiempo mediante una función se detecta el caudal y el volumen de agua (Ver Fig. 93).

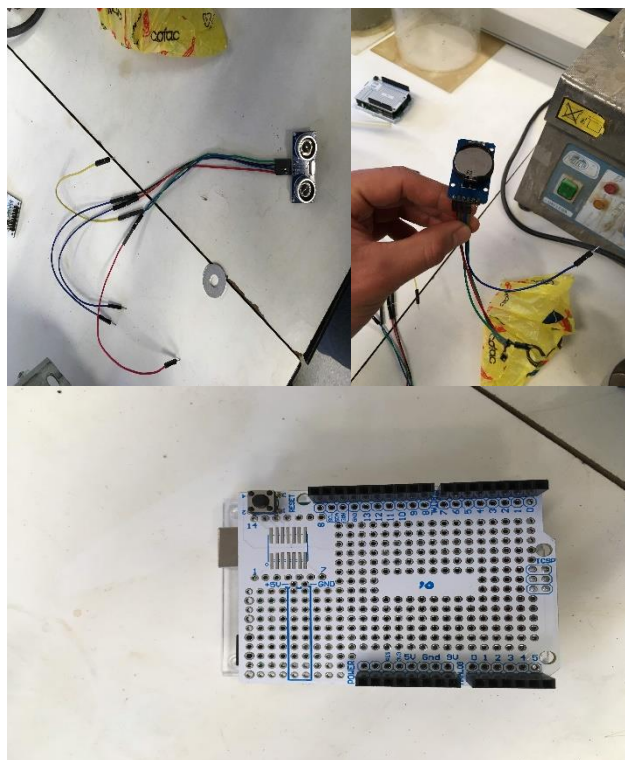


Fig. 93 Sensor de distancia ultrasonido HC-SR04, reloj de tiempo real (RTC DS3231) y placa de conexión Arduino

Para que los sensores con el reloj funcionen conjuntamente y guarde los datos en una tarjeta SD se utiliza la placa Arduino alimentada por una batería regulada por un transformador. Tanto los sensores como las placas de Arduino están protegidos por una caja hermética. Antes de llevar al campo se hicieron pruebas de calibración en laboratorio (Ver Fig. 94).



Fig. 94 Calibración en laboratorio

Parte de este trabajo fue colaboración en el trabajo de (Guachizaca Contenido, 2018) para armar y configurar los sensores y finalmente ajustar la programación para mediciones y funcionamiento en campo. Se detalla en la Fig. 95 y Fig. 96 la instalación de sensores para medir la esorrentía en campo y en la Fig. 97 el detalle de diseño (Ver ANEXO 4).



Fig. 95 Canaletas en campo



Fig. 96 Instalación de sensores para medir escorrentía en campo

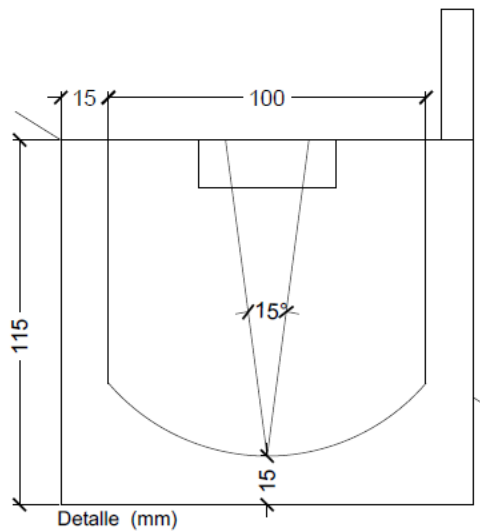


Fig. 97 Detalle del aliviadero de la canaleta en campo

A continuación se presenta en la de Fig. 98 los caudales recogidos a la salida de la canaleta de la zona Norte no Vegetada en función del tiempo.

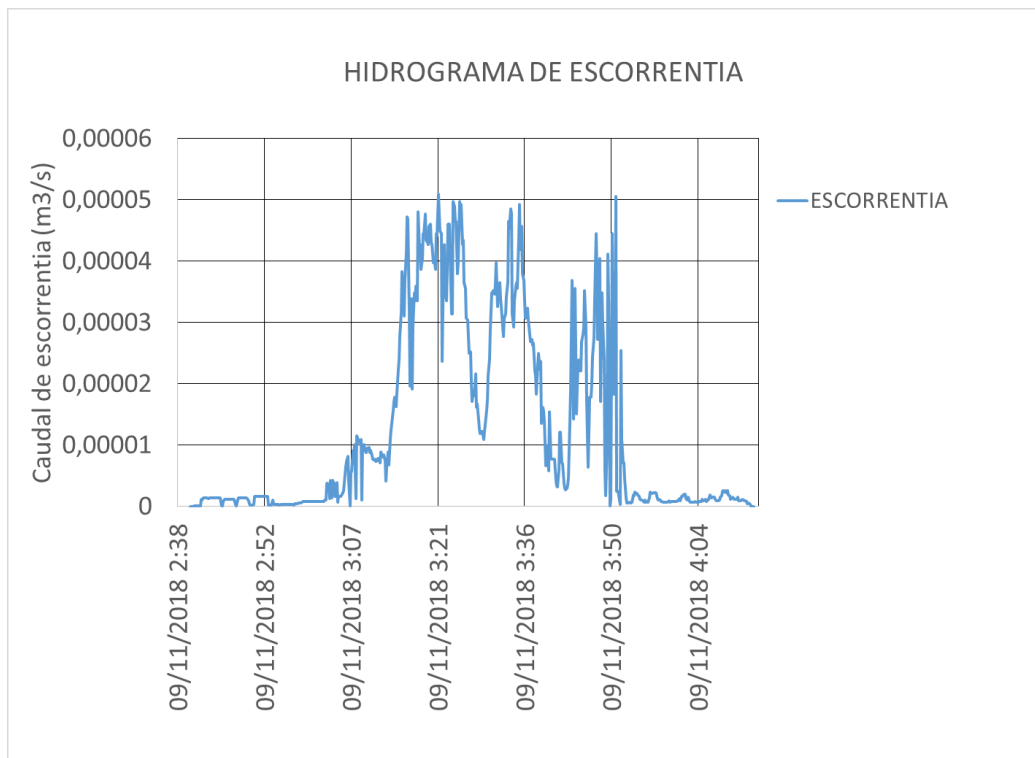


Fig. 98 Gráfica de caudales en canaleta (Zona Norte no Vegetada) entre las 2:38 y las 4:10 del 9/11/2018

4.3 Infiltración

Infiltración es la acción mediante el agua en superficie se introduce en el suelo, que depende de las características de éste (porosidad, conductividad hidráulica y contenido de agua) y su vegetación. Si bien existen funciones empíricas para calcular la infiltración, son únicamente aproximadas debido a su gran sensibilidad en dependencia a variables como su humedad, entre otras (Chow et al. 1994).

La infiltración se puede calcular mediante la teoría de Horton establecida en 1933 y descrita en (Chow et al. 1994), donde describe que el agua captada por precipitación menos el agua captada por escorrentía, da como resultado al agua infiltrada (Ver Fig. 99).



Fig. 99 Distribución de la precipitación en función del tiempo (Chow et al. 1994)

Para calcular la escorrentía en el caso de una cuenca hidrológica de una cierta extensión puede utilizarse la metodología descrita en (Chow et al. 1994). Hay que tener en cuenta que ese caso hay un desfase en el tiempo entre que se produce la lluvia y la infiltración y se mide la escorrentía recogida en el río.

El índice (ϕ), es la tasa constante de infiltración promedio (mm/h), que produce un hietograma de exceso de precipitación (escorrentía) con una profundidad total igual a la profundidad de la escorrentía directa (r_d) y se calcula de la siguiente forma (Chow et al., 1994):

$$r_d = \sum_{m=1}^M (R_m - \phi \Delta t) \quad \text{ec 3}$$

Donde:

R_m : Es la precipitación que se observa en mm, en un intervalo de tiempo m

M: Número de intervalos de lluvia que realmente contribuyen a la escorrentía directa

Δt : Intervalo de tiempo

Nota: ϕ y M se ajustan tantas veces se necesiten para que (r_d) sea igual al exceso de precipitación

$$r_d = \frac{V_d}{A}$$

ec 4

Donde:

V_d : Volumen total de la escorrentía directa

A : Área en planta afectada

En el caso del terraplén, el desfase temporal entre el momento de la lluvia y la medida del caudal de escorrentía es menor que el intervalo de tiempo entre las medidas de lluvia (5min). Por lo tanto puede calcularse la infiltración como la diferencia entre la lluvia y la escorrentía.

Para estimar la permeabilidad en campo como se ve en la Fig. 100, se ejecutaron ensayos con el “Mini Disk Infiltrometer”.



Fig. 100 Ensayos de permeabilidad en campo

Los valores obtenidos de la permeabilidad se muestran en la Tabla 9

DESCRIPCION	ZONA	K	UNIDAD	K	UNIDAD
VEGETADA 1	NORTE	3,82E-04	cm/s	3,82E-06	m/s
VEGETADA 2	NORTE	4,56E-04	cm/s	4,56E-06	m/s
VEGETADA 3	NORTE	3,74E-04	cm/s	3,74E-06	m/s
VEGETADA 4	NORTE	7,01E-04	cm/s	7,01E-06	m/s
VEGETADA 5	NORTE	6,16E-04	cm/s	6,16E-06	m/s
VEGETADA 6	NORTE	1,40E-04	cm/s	1,40E-06	m/s
VEGETADA 7	NORTE	2,34E-04	cm/s	2,34E-06	m/s
NO VEGETADA 1	NORTE	3,28E-04	cm/s	3,28E-06	m/s
NO VEGETADA 2	NORTE	2,07E-04	cm/s	2,07E-06	m/s
CORONA NO VEGETADA	NORTE	6,11E-04	cm/s	6,11E-06	m/s

Tabla 9 Valores de permeabilidad obtenidos en el terraplén

A continuación en la Tabla 10 se presentan los resultados del cálculo de la profundidad de escorrentía e índice de infiltración analizados en el evento del día 9 de noviembre del 2018 entre las 0:00 y las 4:10:

Volumen de escorrentía directa	0,071	m³
Área	17,23	m²
Profundidad de escorrentía directa	4,09	Mm
Intervalo de tiempo Δt	300	s
Φ	0,00298	mm/s
Φ	0,011	m/h
Profundidad de infiltración	0,0895	mm

Tabla 10 Datos y resultado de la profundidad de escorrentía directa e índice de infiltración analizado el 9 de noviembre del 2018, talud NnV

Se presenta también en la siguiente Tabla 11 los volúmenes calculados de precipitación escorrentía, e infiltración y en la Fig. 101 su representación gráfica en relación al tiempo:

	m3	lt	m3/d	l/min
PRECIPITACION	0,38	378,99	2,37	1,65
ESCORRENTIA	0,07	70,57	1,02	0,71
INFILTRACION	0,31	308,4	1,93	1,34

Tabla 11 Volúmenes de precipitación escorrentía e infiltración analizado el 9 de noviembre del 2018 (Talud NnV) entre las 0:00 y las 4:10

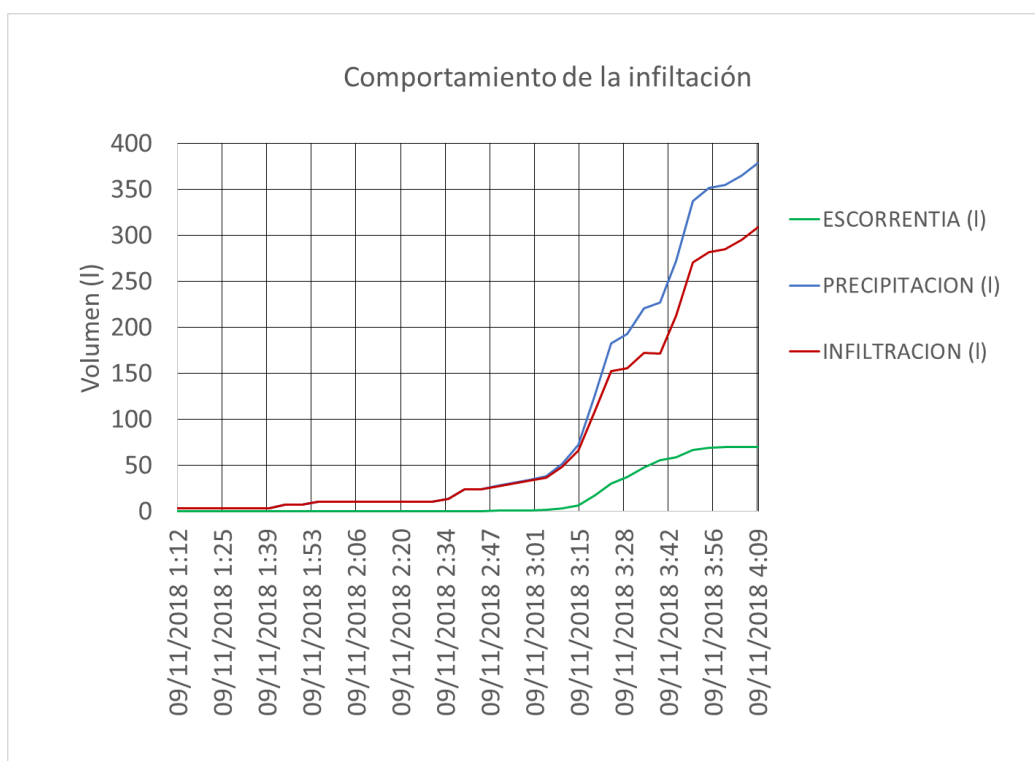


Fig. 101 Representación gráfica de la precipitación, escorrentía e infiltración medida

En la siguiente tabla se muestran los valores del gradiente promedio durante el proceso de infiltración para dos de las permeabilidades estimadas del lado norte no vegetado

q (m/s)	k(m/s)	i
3,61E-06	2,68E-06	1,348598

Tabla 12 Gradiente hidráulico calculado a partir de permeabilidades calculadas en campo y tasa de infiltración en el talud Norte no Vegetado

4.4 Erosión

4.4.1 Formulación empírica

La erosión es la pérdida de material superficial debido a los agentes climáticos. En general para cuantificar estas pérdidas, se han desarrollado teorías en la agronomía (Universal Soil Loss Equation), y en obras lineales como en el trabajo de (Hernando & Romana, 2010), que se enfocaron a pendientes más pronunciadas (Ver ANEXO 3).

Su formulación es empírica y se describe a continuación:

$$A = Ls * R * K * VM \quad \text{ec 5}$$

Donde:

A: pérdida de suelo por unidad de superficie y tiempo (t/(ha-año))

R: índice de erosión pluvial (hJ.cm/(m².h.año))

K: parámetro de erosionabilidad del suelo (t.m².h / (ha.hJ.cm))

LS: parámetro de geometría del talud (-), que depende de la longitud potencial y pendiente del reguero

VM: parámetro de control de la erosión (-)

Se presenta también la siguiente tabla de rangos para los parámetros en España:

	Descripción	Rango	Unidades
Ls	Parámetro de la geometría del suelo	30-40	(-)
R	Índice de erosión pluvial	30-550	(hJ.cm/(m ² .h.año))
K	Parámetro de erosionabilidad del suelo	0,02-1	(t.m ² .h / (ha.hJ.cm))
VM	Parámetro de control de erosión	0,01-1	(-)

Tabla 13 Rangos para cuantificar la erosionabilidad del suelo (Hernando & Romana, 2010).

Se presenta también la siguiente tabla de criterios de rangos de pérdida de material:

Calificación de erosión	Nivel de erosión	Erosión
Nula	1	0-5
Ligera	2	5-10
Baja	3	10-25
Moderada baja	4	25-50
Moderada alta	5	50-100
Alta	6	100-200
Muy alta	7	>200

Tabla 14 Criterio de rangos de erosión del suelo (Hernando & Romana, 2010).

4.4.2 Metodología

Para cuantificar el material erosionado en el terraplén, se han colocado geotextiles sobre las canaletas que recogen el agua por escorrentía. El material que se acumula en estos geotextiles es recogido y llevado a laboratorio para determinar su peso y granulometría. (Ver Fig. 102, Fig. 103 y Fig. 104).



Fig. 102 Material acumulado en canaletas del Talud Norte no Vegetado el 15/10/2018



Fig. 103 Material recogido de canaletas del Talud Norte no Vegetado el 15/10/2018



Fig. 104 Material ensayado en laboratorio

Para cuantificar la altura erosionada, se obtiene con la siguiente formula:

$$V_e = \frac{M_s}{\rho_s} \quad \text{ec 6}$$

Donde:

V_e : Volumen erosionado

M_s : Masa seca

ρ_d : Densidad seca

$$h_e = \frac{V_e}{A_i} \quad \text{ec 7}$$

Donde:

A_i : Área inclinada que le corresponde al material erosionado

h_e : Altura del material erosionado

Laboratorio

El material identificado es pesado en húmedo y se toma una muestra de cada bandeja para determinar su humedad y restar de su peso húmedo para cuantificar el peso seco del material.

$$w\% = \frac{(B+PH)-(B+PS)}{(PS-B)} * 100$$

ec 8

Donde:

w%: Porcentaje de humedad

B+PH: Peso de la bandeja más suelo húmedo

B+PS: Peso de la bandeja más suelo seco

PS-B: Peso seco menos peso de la bandeja

El suelo es clasificado según sus tamaños de partículas entre bloques, bolos, gravas, arenas, limos o arcillas (Ver Tabla 15). Para esto el material es ensayado por tamizado por la normativa ASTM D422, para determinar el tipo de partícula que erosiona respecto a la granulometría inicial ensayado en el trabajo de (Cevallos, 2017) (Ver ANEXO 1).

Tipo de suelo	Tamaño de las partículas
Bloques	>30 cm
Bolos	15 a 30 cm
Gravas	0.2 a 15 cm
Arenas	0.06 a 2 mm
Limos	2 a 60 μm
Arcillas	< 2 μm

Tabla 15: Clasificación básica de los suelos según el tamaño de sus partículas.

4.4.3 Resultados

Los datos con los que se trabaja son:

DATOS DEL TERRAPLEN			
	a en planta	5,02	m
	b en planta	3,7	m
	Ángulo del talud	33	grados
	Ángulo del talud	0,58	radianes
	Longitud inclinada (Lo)	4,41	m
	Lo hasta canaletas	4,06	m
	Área inclinada	22,15	m ²

Tabla 16 Datos para cálculo de altura erosionada

Los resultados se presentan en la siguiente tabla resumen:

Fecha Inicio de erosión	Fecha recogida	t días	Zona	Peso seco (gr)	h (cm)	Tasa de erosión (A) t/(ha año)	Lluvia Acumulada (mm)	I de lluvia (mm/d)
22/03/18	30/10/18	222	NV	7281,87	0,02	5,41	438,4	1,97
15/10/18	30/10/18	15	NnV	2984,00	0,01	32,79	72	4,80
22/03/18	30/10/18	222	SnV	52330,98	0,17	38,85	438,4	1,97
22/03/18	15/10/18	207	NnV	31174,82	0,10	24,82	366,6	1,77

Tabla 17 Tabla resumen del material erosionado por zonas

En general los resultados dan a conocer que el lado vegetado reduce notablemente la erosión hasta en un 80% promedio. La altura erosionada en 222 días del lado Norte no vegetado es 0.11 cm, en el lado Norte vegetado es de 0.02cm y en el Sur lado no vegetado de 0.17 cm en 222 día. El suelo erosionado del lado sur vegetado todavía no es pesado ni caracterizado granulométricamente. Existen muestras que serán parte de un trabajo a futuro.

También se puede observar que el tasa de erosionado tiene mayor dependencia de la intensidad de la lluvia que del tiempo o la lluvia acumulada. Es por esto que la tasa de erosión en lado norte no vegetado en un periodo de 15 días y lluvia acumulada de 72mm, mucho menor que en un periodo de 207 días y lluvia acumulada de 366.6 mm, tiene mayor velocidad de erosión. Por otro lado la cantidad total del material erosionado si depende más de la lluvia acumulada en un rango de tiempo.

Según la Tabla 14, el suelo no vegetado tiene una erosión moderada baja y el suelo con vegetación una erosión ligera.

Al comparar con la ecuación de Universal Soil Loss Equation, presentadas en (Hernando & Romana, 2010) y tomando como valor fijo el parámetro LS de 8.82 (Parámetro en función de la geometría y la pendiente) para nuestro talud se tiene que (Ver Tabla 18 y ANEXO 3):

Descripción	A t/(ha.año)	Rangos de USLE t/(ha.año)
NV	5,41	0,053-4848,8
NnV	32,79	0,053-4848,8
SnV	38,85	0,053-4848,8
NnV	24,82	0,053-4848,8

Tabla 18 Tabla comparativa de resultados con los rango tomando parámetros máximos y mínimos

De los resultados se trata de ajustar los parámetros por proporción al suelo no vegetado, teniendo en cuenta que estamos por debajo de la media y se llega a:

Norte y Sur No vegetado			
Descripción		Parámetros ajustado	Unidades
Ls	Parámetro de la geometría del suelo	8,82	(-)
R	Índice de erosión pluvial	141	(hJ.cm/(m ² .h.año))
K	Parámetro de erosionabilidad del suelo	0,2	(t.m ² .h /(ha.hJ.cm))
VM	Parámetro de control de erosión	0,15	(-)
A	Perdida de material	37,29	t/(ha.año)

Tabla 19 Tabla con parámetros ajustados sin vegetación

Para la parte vegetada se toma los mismos valores pero se reducen los valores en los parámetros K y VM:

Norte vegetado

Descripción		Parámetros ajustado	Unidades
Ls	Parámetro de la geometría del suelo	8,82	(-)
R	Índice de erosión pluvial	141	(hJ.cm/(m ² .h.año))
K	Parámetro de erosionabilidad del suelo	0,05	(t.m ² .h / (ha.hJ.cm))
VM	Parámetro de control de erosión	0,09	(-)
A	Perdida de material	5,59	t/(ha.año)

Tabla 20 Tabla con parámetros ajustados con vegetación

En relación a la granulometría del material erosionado, la Tabla 21 muestra los resultados más relevantes.

Fecha Inicio de erosión	Fecha recogida	Tiempo	Descripción	%Grava	%Arena	%Finos
18/06/2018	30/10/2018	134	NV	8,35	53,39	38,26
15/10/2018	30/10/2018	15	NnV	4,82	87,12	8,06
18/06/2018	30/10/2018	134	SnV	1,10	53,58	45,31
18/06/2018	15/10/2018	119	NnV	9,35	58,45	6,36

Tabla 21 Resumen de ensayos granulométricos por tamizado.

En la Fig. 105, se muestra la granulometría del material erosionado y el material original. Del lado norte vegetado y sur no vegetado tiene un porcentaje de finos similar del 40% al material original, mientras que el lado norte no vegetado el porcentaje del material fino erosionado es menor y tiene una diferencia del orden de 30% con respecto al original. La arena erosionada es muy similar, con una diferencia del 5 a 10 % respecto al original, con excepción del norte no vegetado con un porcentaje mayor de arena erosionado con una diferencia del 20%. El material grueso o grava erosionado es menor que el original con una diferencia del 10 al 5 %.

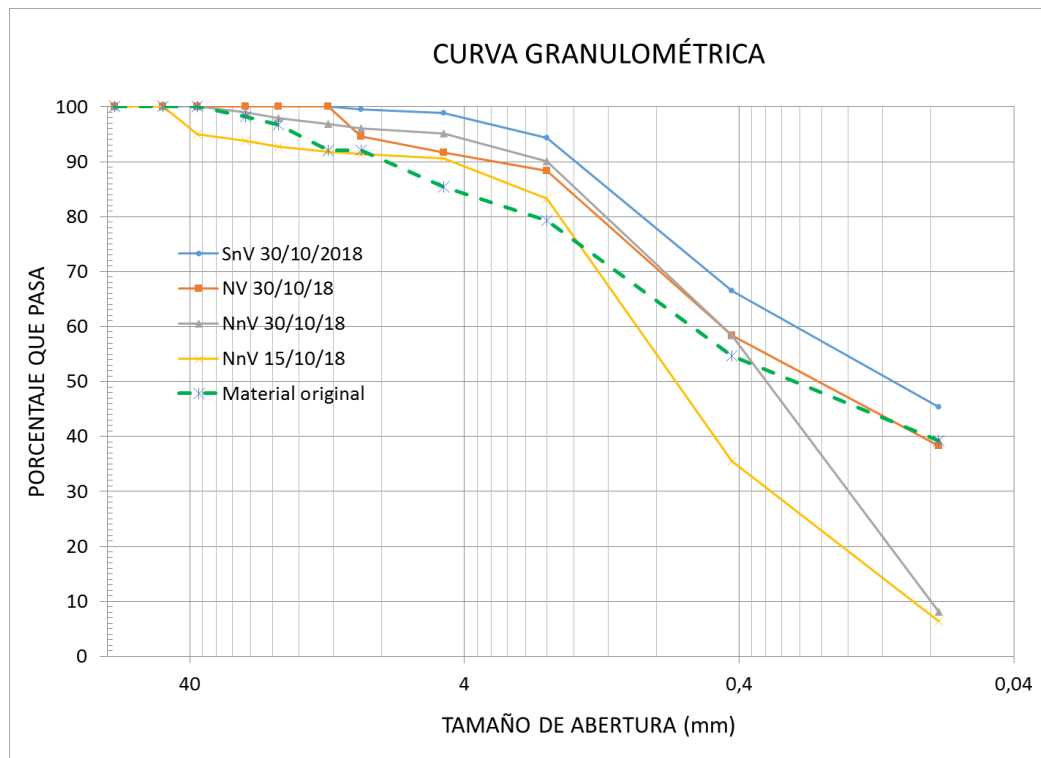


Fig. 105 Curva granulométrica de material erosionado

5. Conclusiones y líneas de trabajo futuras

5.1 Conclusiones

Tras el análisis de la evaluación del contenido volumétrico de agua y la precipitación se ha propuesto una formulación empírica para determinar el incremento del contenido volumétrico de agua que satisface que los incrementos de grandes magnitudes de agua en el suelo relativamente hablando solo se pueden dar si el material tiene un contenido de agua inicial bajo y las lluvias son importantes. El lado vegetado se ve afectado más por el efecto de lluvia que el lado no vegetado. Esto también se denota en las gráficas de contenido volumétrico de agua, succión y curvas de retención donde se ve que por efectos de incremento de precipitación en suelos vegetados incrementa rápidamente el contenido de agua y reduce su succión. Lo que indica un incremento de la permeabilidad debido a la existencia raíces.

Se observa también que la vegetación reduce la porosidad, como interpretación en las curvas de retención donde se visualiza una reducción notable del contenido volumétrico de agua para una misma succión.

Se conoce que la precipitación es el factor desencadenante más importante, si bien es cierto que la vegetación tiene altas capacidades de absorción e incrementa la succión, también incrementa notablemente la permeabilidad. En este caso si la raíces no se encuentra todavía en la zona de falla, la vegetación únicamente va a permitir que el agua ingrese más rápido y provoque presiones de agua en épocas de lluvia. Es más al tratarse de una planta solo absorbe el agua que necesita y si el material se encuentra saturado como la planta, esto podría tener ningún efecto estabilizador.

Se puede observar en los gráficos de curvas de retención que el efecto de secado y saturación provoca cambios en los índices de vacíos, por lo tanto el material está en constantes variación y los parámetros de modelación para predicción de roturas no podrían tener la porosidad como un dato fijo.

Si se considera la erosión como un deslizamiento o desprendimiento muy superficial debido a agentes climáticos, como medidas de estabilidad y de menor mantenimiento

en taludes expuestos en obras lineales, la vegetación reduce notablemente el efecto de la erosión hasta en un 80%. Según lo descrito en (Hernando & Romana, 2010) la tasa de erosión en el talud norte y sur no vegetado se considera moderada baja y el talud norte vegetado se considera ligera.

5.2 Líneas de trabajo futuras

Con los parámetros estimados en el lado vegetado y no vegetado en curvas de retención, tasas de infiltración y permeabilidad se sugiere introducir en el programa de modelación numérica “Code&Bright” para comparar resultados de la modelación con los datos leídos en sensores y ajustar un modelo más fiable, tanto para un suelo con vegetación como para uno sin.

Con relación a las curvas de retención se observa en periodos de mojado que el material incrementa el contenido volumétrico de agua sin reducir su succión por cierto periodo hasta una caída inmediata de la succión y así repetitivamente. Por lo cual se sugiera investigar el material en laboratorio para entender este comportamiento o si se tratase de una reducción de los poros por un aumento de agua y si tiene una relación con otros parámetros como la temperatura o la introducción de raíces.

La formulación para estimar la variación del contenido volumétrico de agua tiene su aproximación en estratos superficiales. Se podría implementar dos parámetros más que relacionen la profundidad del estrato y la temperatura.

El material erosionado se tiene que seguir analizando y con datos suficientes se puede deducir una formula empírica tomando en cuenta la intensidad de la lluvia, la geometría del talud y la tasa de infiltración en función del material para estimar tasas de erosión en lados vegetados y no vegetados.

Teniendo en cuenta que la instrumentación para medir la escorrentía funciona pero se ve afectado por la humedad, se sugiere implementar una caja hermética y reducir la humedad interior para implementar en todas las zonas del terraplén.

6. Referencias

- Carminati, A., Moradi, A. B., Vetterlein, D., Vontobel, P., Lehmann, E., Weller, U., ... Oswald, S. E. (2010). Dynamics of soil water content in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 332(1), 163–176. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0283-8>
- Carminati, A., Vetterlein, D., Koebernick, N., Blaser, S., Weller, U., & Vogel, H. J. (2013). Do roots mind the gap? *Plant and Soil*, 367(1–2), 651–661. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1496-9>
- Casini, F., Askarinejad, A., & Springman, S. M. (2016). Infiltration-induced Slope Instability: a multi-scale approach. 3rd European Conference on Unsaturated Soils. *E3S Web of Conferences*, 9, 04005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160904005>
- Cevallos, A. (2017). Construcción e instrumentación de un terraplén experimental para el estudio de la interacción atmósfera-vegetación-suelo. Trabajo de Fin de Master. UPC.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología Aplicada. McGRAW- HILL.
- Guachizaca Contento, V. F. (2018). Análisis de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en un talud experimental. Trabajo de Fin de Master. UPC. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/119681>
- Hernando, D., & Romana, M. G. (2010). Una propuesta de umbrales para valorar la erosión en taludes de obras lineales, *Ingeopress* 191, 28-37.
- Orense, R., Shimoma, S., Maeda, K., & Towhata, I. (2004). Instrumented Model Slope Failure due to Water Seepage. *Journal of Natural Disaster Science*, 26(1), 15–26. <https://doi.org/10.2328/jnds.26.15>
- Romero, E., Della Vecchia, G., & Jommi, C. (2011). An insight into the water retention properties of compacted clayey soils. *Géotechnique*, 61(4), 313–328. <https://doi.org/10.1680/geot.2011.61.4.313>

ANEXOS

ANEXO 1 Ensayos de laboratorio

Granulometría (ASTM D422)

Equipo y herramientas:

- Balanza con precisión de 0,01 gramos.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable ($110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$).
- Mazo de goma y cubeta de goma.
- Bandejas.
- Cepillo y brocha para limpiar tamices.
- Serie de tamices según Tabla 22.

Nº de Tamiz (ASTM)	Abertura (mm)
1½"	37.5
1"	25
¾"	19
½"	12.5
⅜"	9.5
4	4,76
10	2
20	0,85
40	0,425
60	0,25
100	0,15
200	0,075

Tabla 22: Abertura y designación tamices ASTM.

Procedimiento:

- Preparación de la muestra:
 - Se seca el material recogido en campo y en función de sus partículas se toma la cantidad para la granulometría por tamizado.
 - Desmenuzar el material en una cubeta con un martillo de goma, evitando así la destrucción de las partículas más gruesas.
 - Se separa el material retenido en el tamiz No 4 para la parte gruesa y lo que pasa el No 4 se toma aproximadamente de 100 a 500 gramos.
- Para parte retenida (No 4):
 - Proceder con la granulometría, pesando el material retenido en cada tamiz.
- Para parte pasada el (No 4):
 - Pesar el material seco antes de lavarlos. Lavar material en el tamiz 200 debajo del grifo, evitando que el material rebose por arriba, hasta que el agua salga limpia.
 - Poner el material en una bandeja y meter al horno durante 24 horas \pm 105°.
 - Pesar material seco y proceder con la granulometría, pesando el material retenido en cada tamiz

Humedad Natural (UNE 103300-1993)

Equipo y herramientas:

- Muestra de suelo.
- Balanza con precisión de 0,01 gramos.
- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable ($110^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$).
- Guantes, espátula, recipiente metal.

Procedimiento:

- Del suelo tomado en campo, previamente guardada en la cámara húmeda para evitar pérdidas o absorción de humedad, se toma una muestra representativa de suelo.
- La muestra se puede tomar entre de 10 a 100 gramos.
- Pesar el recipiente a poner en el horno sin suelo.
- Colocar la muestra húmeda en el recipiente y pesarlo.
- Colocar el material húmedo y recipiente en el horno por 24 h.
- Pesar el recipiente con la muestra seca de forma rápido posible, para evitar la absorción de humedad.

- Cálculo humedad

$$\frac{B+PH-(B+PS)(PS-B)}{PS-B} * 100 \quad ec 8$$

Donde:

w%: Porcentaje de humedad

B+PH: Peso de la bandeja más suelo húmedo

B+PS: Peso de la bandeja más suelo seco

PS-B: Peso seco menos peso de la bandeja

ANEXO 2 Curva de retención

Siendo un material de doble porosidad, se considera un modelo de retención multimodal por *Van Genuchten (1980)*, donde se incorpora una segunda curva de retención (microestructura) y continuidad de la macro estructura. Para relacionar directamente la saturación y la succión se aplica la siguiente formula:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = (1 - w) \left(1 + \left(\frac{S}{P_M} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_M}} \right)^{-\lambda_M} + w \left(1 + \left(\frac{S}{P_m} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_m}} \right)^{-\lambda_m} \quad \text{ec 9}$$

Dónde:

S_{ls} : Grado saturación máximo

S_l : Grado saturación

S_{rl} : Grado de saturación residual

P_m : Entrada de aire en la micro estructura

P_M : Entrada de aire en la macro estructura

λ_m : Parámetros de forma de la micro estructura de *Van Genuchten*

λ_M : Parámetros de forma de la macro estructura de *Van Genuchten*

w : Factor de ponderación

ANEXO 3 Erosionabilidad del suelo

Para determinar la erosionabilidad se utiliza la ecuación de Universal Soil Loss Equation (USLE), adaptada por Israelsen et al. (1980), tomada en el trabajo de (Hernando & Romana, 2010)

$$A = Ls * R * K * VM \quad \text{ec 5}$$

Donde:

A: pérdida de suelo por unidad de superficie (t/(ha-año))

R: índice de erosión pluvial (hJ.cm/(m².h.año))

K: parámetro de erosionabilidad del suelo (t.m².h / (ha.hJ.cm))

LS: parámetro de geometría del talud (-), que depende de la longitud potencial y pendiente del reguero

VM: parámetro de control de la erosión (-)

El índice de erosión pluvial (R), toma en consideración la máxima intensidad en treinta minutos y la energía cinética como se muestra a continuación (Hernando & Romana, 2010):

$$R = \sum_{I=1}^N \left[\frac{EI_{30}}{100} \right]_i \quad \text{ec 10}$$

Donde N es el número de tormentas, E la energía cinética de la tormenta e I₃₀ la intensidad de lluvia en un intervalo de treinta minutos.

El parámetro de erosionabilidad (K), que representa la capacidad para resistir la erosión de la lluvia se determina de la siguiente forma (Hernando & Romana, 2010):

$$100 * K = 10^{-4} 12.71 M^{1.14} (12 - a) + 4.20 (b - 2) + 3.23 (c - 3) \quad ec 11$$

Donde:

M: factor representativo de la textura

a: porcentaje de la materia orgánica

b: parámetro de la estructura del suelo

c: parámetro de la permeabilidad del suelo

El parámetro de geometría (LS), está en función del largo del reguero en metros (λ), un factor dependiente de la pendiente ($m=0.5$ para pendientes mayores al 5%) y el ángulo de inclinación (θ) en grados. Se presenta la formula por Wischmeier y Smith en 1978 en el trabajo de (Hernando & Romana, 2010):

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1} \right)^m (65.41 \text{sen}^2 \theta + 4.56 \text{sen} \theta + 0.065) \quad ec 12$$

Para el cálculo de la pérdida de material (A), se tomó únicamente el parámetro de geometría (LS) y los otros (R, K y VM) se toman los máximos y mínimos para ver en que rango se encuentra nuestro material.

ANEXO 4 Plano de detalle del rebosadero de la canaleta para medir el canal de escorrentía

